

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Kateřina NOVOTNÁ

**VYUŽITÍ HYPERSPEKTRÁLNÍCH DAT K DETEKCI A
KLASIFIKACI VYBRANÝCH ANTROPOGENNÍCH
MATERIÁLŮ**

**USE OF HYPERSPECTRAL DATA FOR DETECTION AND
CLASSIFICATION OF SELECTED ANTHROPOGENIC MATERIALS**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Lucie Kupková, Ph.D

Praha 2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 26. 8. 2013

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych v první řadě ráda poděkovala vedoucí mé diplomové práce RNDr. Lucii Kupkové, Ph.D. za odborné vedení práce a věnovaný čas. Ráda bych také poděkovala České informační agentuře životního prostředí za poskytnutí dat AISA a Českému úřadu zeměměřičskému a katastrálnímu za poskytnutí dat ZABAGED. Dále bych chtěla poděkovat Mgr. Lucii Červené, Mgr. Jakobovi Bendovi, Bc. Janu Kufnerovi, Mgr. Ivě Němečkové, Františkovi Brynychovi, Naděždě Novotné a Danielu Novotnému za pomoc při pozemní kampani. Za věcné připomínky a korektury děkuji Mgr. Lucii Červené, Mgr. Lence Hladíkové, Bc. Anně Hladké a Bc. Janu Kufnerovi. A v neposlední řadě také děkuji rodině za podporu v průběhu celého studia.

Využití hyperspektrálních dat k detekci a klasifikaci vybraných antropogenních materiálů

Abstrakt

Práce se zabývá možnostmi využití hyperspektrálních dat senzorů APEX a AISA k detekci a klasifikaci antropogenních materiálů v území Čáslavi, Rokytnice nad Jizerou a Harrachova. Hlavním cílem práce bylo navrhnout metodiku detekce a klasifikace střešních krytin a povrchů komunikací na základě vytvořených spektrálních knihoven. Dalším cílem bylo zhodnotit možnosti využitelnosti spektrálních knihoven pro klasifikaci, porovnat možnosti hyperspektrálních dat s větším a menším spektrálním rozsahem a vytvořit mapy sledovaných antropogenních materiálů. V metodické části je popsán postup zpracování, zahrnující vytvoření masek antropogenních materiálů pro komunikace a střešní krytiny, nastavení parametrů čtyř vybraných klasifikačních algoritmů (Linear Spectral Unmixing, Multiple Endmember Mixture Analysis, Spectral Angle Mapper, Spectral Information Divergence) a zhodnocení přesnosti klasifikace. Výsledky jsou vizualizovány a zhodnoceny z hlediska vypočtené celkové přesnosti klasifikace a celkového podílu klasifikovaných pixelů. Na závěr jsou dosažené výsledky porovnány s existujícími studiemi a jsou uvedena možná vylepšení pro pokračování práce na tomto tématu.

Klíčová slova: hyperspektrální data, antropogenní materiály, klasifikace, spektrální knihovna, binární maska, města Rokytnice nad Jizerou, Harrachov a Čáslav

Use of hyperspectral data for detection and classification of selected anthropogenic materials

Abstract

The thesis deals with use of hyperspectral data from APEX and AISA sensors for detection and classification of anthropogenic materials in the areas of Čáslav, Rokytnice nad Jizerou and Harrachov. The main goal is to propose methodology for the detection and classification of roof materials and road surface materials based on established spectral libraries. Another goal is to evaluate applicability of spectral libraries for classification, to compare possibilities of hyperspectral data with larger and smaller spectral range and to create maps of anthropogenic materials above. The methodological approach including masks of anthropogenic materials for roads surface materials and roof materials creation, settings of four classifications algorithms (Linear Spectral Unmixing, Multiple endmember spectral mixture analysis, Spectral Angle Mapper, Spectral Information Divergence) parameters and assessment of classification results, is in the methodology part. The results are visualized and evaluated using overall accuracy and percentage of classified pixels. Finally the results are compared with existing studies and possible improvements for further research are proposed.

Keywords: hyperspectral data, anthropogenic materials, classification, spectral library, binary mask, cities of Rokytnice nad Jizerou, Harrachov and Čáslav

OBSAH

Obsah	5
Seznam obrázků a tabulek	7
Přehled použitých zkratk.....	10
1 Úvod.....	12
2 Úvod do problematiky.....	13
2.1 Vhodnost hyperspektrálních dat pro detekci antropogenních materiálů.....	13
2.2 Hyperspektrální senzory AISA a APEX.....	15
2.3 Pozemní spektrometr	16
2.4 Vlastnosti antropogenních materiálů	17
2.4.1 Asfalt, beton, štěrk a další materiály	18
2.4.2 Střešní krytiny	19
2.5 Současný stav a potíže při detekci antropogenních materiálů	21
2.5.1 Data a spektrální knihovna.....	22
2.5.2 Předzpracování obrazu.....	22
2.5.3 Metody detekce antropogenních materiálů	23
2.5.4 Výsledky a současné řešení sledované tematiky.....	25
3 Použitá Data a Metodika	30
3.1 Modelová území	30
3.2 Vstupní data.....	31
3.2.1 Letecká data AISA.....	31
3.2.2 Letecká data APEX.....	32
3.2.3 Data pozemního měření	34
3.3 Metodika.....	35
3.3.1 Spektrální knihovna	35
3.3.2 Úprava leteckých dat.....	37
3.3.3 Tvorba masky komunikací a střech z dat APEX	38
3.3.4 Tvorba masky komunikací a střech z dat AISA	39
3.3.5 Klasifikační algoritmy	41

3.3.6	Klasifikace snímků.....	42
3.3.7	Hodnocení přesnosti.....	45
4	Výsledky	48
4.1	Spektrální knihovna Čáslav	48
4.2	Spektrální knihovna Harrachov	50
4.3	Spektrální knihovna Rokytnice nad Jizerou	53
4.4	Porovnání spektrálních knihoven z jednotlivých území	56
4.5	Vizuální interpretace klasifikací a zhodnocení přesnosti	59
4.5.1	Zhodnocení přesnosti klasifikací z území Rokytnice nad Jizerou	61
4.5.2	Zhodnocení přesnosti klasifikace z území Harrachova.....	64
4.5.3	Zhodnocení přesnosti klasifikace z území Čáslavi	68
5	Shrnutí a Diskuze	72
5.1	Návrh metodiky detekce a klasifikace antropogenních materiálů	72
5.2	Zhodnocení možnosti využitelnosti spektrálních knihoven.....	74
5.3	Porovnání možností leteckých dat s vyšším a nižším spektrálním rozsahem.....	76
5.4	Vhodný postup klasifikace	77
5.5	Srovnání výsledků této práce s výsledky ze zkoumaných studií	77
6	Závěr.....	79
	Seznam literatury a použitých zdrojů	81
	Přílohy.....	85

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

Obr. 1	Spektrum pořízené multispektrálním senzorem (dole) a spektrum pořízené hyperspektrální senzorem (nahore).....	14
Obr. 2	Části senzoru APEX	16
Obr. 3	Spektrální křivka asfaltu	18
Obr. 4	Spektrální křivka střešní tašky (vlevo) a červených úlomků (vpravo)	19
Obr. 5	Spektrální odrazivost zinku (vlevo) a bitumenu (vpravo)	20
Obr. 6	Spektrální křivka polyetylenu.....	21
Obr. 7	Poloha snímku z území Čáslavi a okolí.....	32
Obr. 8	Poloha snímků vybraných pro oblast Krkonoš.....	33
Obr. 9	Spektrální křivka před korekcí (vlevo) a po korekci (vpravo).....	36
Obr. 10	Spektrum střechy odebrané z neupraveného snímku.....	37
Obr. 11	Schéma tvorby masky z polohopisných dat ZABAGED.....	38
Obr. 12	Výpočet masky komunikací a budov.....	39
Obr. 13	Schéma tvorby masky komunikací nad daty AISA	41
Obr. 14	Spektrální křivka povrchů komunikací z laboratorních spekter	48
Obr. 15	Spektrální křivky povrchu komunikací ze snímku v Čáslavi	49
Obr. 16	Spektrální křivky střešních krytin.....	50
Obr. 17	Spektrální křivky povrchu komunikací v Harrachově.....	50
Obr. 18	Spektrální křivka asfaltu s křemenem a křemen.....	51
Obr. 19	Spektrální křivky z kontaktní sondy a ze snímku na území Harrachova.....	52
Obr. 20	Střešní krytiny Harrachov.....	52
Obr. 21	Spektrální křivky komunikací v Rokytnici nad Jizerou měřené kontaktní sondou	53
Obr. 22	Spektrální křivky komunikací v Rokytnici nad Jizerou měřené optickým kabelem	54
Obr. 23	Spektrální křivky povrchu komunikací z měření optickým kabelem, kontaktní sondou a ze snímku	55
Obr. 24	Spektrální křivky střešních krytin z Rokytnice nad Jizerou	56
Obr. 25	Spektrální křivky asfaltu.....	56
Obr. 26	Spektrální křivka betonu	57

Obr. 27	Spektrální křivky střešních krytin pro Harrachov a Rokytnici nad Jizerou	58
Obr. 28	Spektrální křivky střešních krytin z území Harrachova, Rokytnice nad Jizerou a z Čáslavi	59
Obr. 29	Chybné klasifikace vlivem nedokonalostí masky povrchů komunikací (vlevo) a typů střešních krytin (vpravo) v Čáslavi.....	60
Obr. 30	Štěrková parkoviště Horní Domky klasifikovaná metodami LSU, MESMA, SAM a SID z laboratorních spekter	61
Obr. 31	Štěrková parkoviště Horní Domky klasifikovaná metodami LSU, MESMA, SAM a SID z terénních spekter.....	62
Obr. 32	Štěrková parkoviště Horní Domky klasifikovaná metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter	62
Obr. 33	Klasifikace červené tašky na Horním náměstí metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter	63
Obr. 34	Klasifikace autobusového nádraží metodami LSU, MESMA, SAM a SID z laboratorních spekter.....	64
Obr. 35	Klasifikace autobusového nádraží v Harrachově metodami LSU, MESMA, SAM a SID ze spekter PPI.....	65
Obr. 36	Klasifikace autobusového nádraží v Harrachově metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter	65
Obr. 37	Klasifikace střešních krytin na náměstí v Harrachově metodami LSU, MESMA, SAM a SID ze spekter PPI	66
Obr. 38	Klasifikace střešních krytin na náměstí v Harrachov metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter	66
Obr. 39	Klasifikace ulic Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID z laboratorních spekter.....	68
Obr. 40	Klasifikace ulic Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID ze spekter PPI	69
Obr. 41	Klasifikace ulic Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter	69
Obr. 42	Klasifikace střešních krytin severně od náměstí v Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID z PPI spekter	70
Obr. 43	Klasifikace střešních krytin severně od náměstí v Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter	70

Seznam tabulek

Tab. 1	Absorpční pásma vybraných antropogenních materiálů.....	21
Tab. 2	První dvě úrovně hierarchického modelu	25
Tab. 3	Přehled výsledků sledované tematiky	28
Tab. 4	Parametry senzoru Aisa – Eagle při letecké kampani 29. 6. 2010	31
Tab. 5	Vybrané linie pro analýzu dat	33
Tab. 6	Parametry senzoru APEX při letecké kampani HyMountEcos	34
Tab. 7	Data, místa a způsob měření	34
Tab. 8	Spektrální knihovny	36
Tab. 9	Klasifikační legenda	45
Tab. 10	Výsledky hodnocení přesnosti klasifikací zájmového území Rokytnice nad Jizerou	63
Tab. 11	Výsledky hodnocení přesnosti klasifikací na území Harrachova	67
Tab. 12	Výsledky hodnocení přesnosti klasifikací na území Čáslavi	71
Tab. 13	Nejlepší klasifikační algoritmy	74
Tab. 14	Posouzení vhodnosti spektrálních knihoven pro klasifikaci	75
Tab. 15	Problematická místa klasifikací	76
Tab. 16	Porovnání výsledků diplomové práce a zkoumaných studií	78

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

ADMP	Automated Deremination of Morphological Profiles
ADSOMP	Automated Determination of Scale – Orientation Morphological Profiles
APEX	Airborne Prism EXperiment
ATREM	Atmosphere Removal Algorithm
BRDF	Direkcionální distribuční funkce odrazivosti
CCD	Charged Coupled Device
CENIA	Česká informační agentura životního prostředí
CHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CSU	Kontrolní a úložná jednotka
ČR	Česká republika
DMT	Digitální model terénu
DPZ	Dálkový průzkum Země
EL	Empirical Line
ESA	Evropská kosmická agentura
ETC	Termálním kontrolní box
FEE	Citlivá optika
GIFOV	Pozemní aktuální úhel pohledu
GIS	Geoinformační systémy
FOV	Úhel pohledu
FWHM	Spektrální rozlišení
GPS	Global Position System
IARR	Internal Apparent Reflectance Ratio
IČS	Index červené střechy
IFOV	Aktuální úhel pohledu
IMS	Inerciální měřicí systém
IMU	Inerciální měřicí jednotka
KRNAP	Krkonošský národní park
LIDAR	Light Detection And Ranging
LSU	Linear Spectral Unmixing

MESMA	Multiple Endmemmber
MODTRAN	Moderate Resolution Atmospheric Transmission
MTMF	Mixture Tuned Matched Filtering
NDVI	Normalization Vegetation Index
MVČR	Ministerstvo vnitra České republiky
NIR	Blízké infračervené spektrum
OMU	Optomechanická jednotka
OSU	Optické části
PPI	Index čistoty pixelu
PRODEX	Programme pour le développement des éexperiments
PUSL	Pure Urban Spectral Library
RMSE	Root Meand Square Error
SAM	Spectral Angel Mapper
SID	Spectral Information Divergence
SMA	Spectral Mixture Analysis
STP	Stabilizovaná platforma
SWIR	Střední infračervené spektrum
TCU	Termální řídicí jednotka
TIR	Tepelné infračervené spektrum
ÚSBE AV ČR	Ústav Akademie věd České republiky
VIS	Viditelné spektrum
VNIR	Viditelné a blízké infračervené spektrum
WGS 84	World Geodetic System
ZABAGED	Základní báze geografických dat

1 ÚVOD

Lidská činnost se stává stále významnějším faktorem ovlivňujícím složení, morfologii a strukturu zemského povrchu. Člověk a jeho činnost jsou zdrojem antropogenních materiálů, které mohou být lidstvu prospěšné, ale zároveň nebezpečné. Nejen, že lidstvo tyto materiály vyrábí a používá k výstavbě různých objektů (např. komunikací a budov), ale také různými metodami zkoumá jejich složení a vlastnosti. Jednou z metod výzkumu je dálkový průzkum Země (dále jen DPZ).

Problematika detekce antropogenních materiálů s využitím DPZ byla v České republice doposud řešena na úrovni extrakce budov a komunikací ze snímků, ale pozornost prakticky nebyla věnována problematice složení a vlastnostem antropogenních materiálů. Vhodným datovým zdrojem pro takovou detekci jsou hyperspektrální data, která poskytují téměř spojité informace o jednotlivých materiálech (Shippert, 2003). Ačkoliv máme k dispozici spektrální knihovny antropogenních materiálů městského prostředí z různých částí světa, jsou pro Českou republiku nepoužitelné, protože na území našeho státu jsou tyto materiály do jisté míry specifické.

Hlavním cílem práce tak bylo **navrhnout metodiku detekce a klasifikace** vybraných antropogenních materiálů (střešních krytin a povrchů komunikací) v zájmovém území s využitím hyperspektrálních dat. Vzhledem k tomu, že problematika nebyla na území ČR doposud řešena, není zcela jasné, jaký klasifikační algoritmus je pro detekci antropogenních materiálů nejvhodnější. V práci tak byly vyzkoušeny nejčastěji používané algoritmy, jako je Linear Spectral Unmixing, Multiple Endmember Spectral Analysis, Spectral Angle Mapper a méně frekventovaný Spectral Information Divergence. Na základě hodnocení přesnosti výsledných klasifikací byla stanovena nejvhodnější metoda.

Dalším cílem práce bylo **vytvořit spektrální knihovnu antropogenních materiálů** ve sledovaném území a zhodnotit možnosti její využitelnosti pro klasifikaci. Spektrální knihovna byla vytvořena z dat naměřených v terénu, v laboratoři, ze spekter odebraných přímo ze snímků a také získaných na základě výpočtu indexu čistoty pixelu. Všechny tyto datové zdroje byly použity, aby byla ověřena jejich vhodnost pro detekci antropogenních materiálů.

Protože existují různé typy leteckých dat, byl stanoven třetí cíl: **Porovnat možnosti** využití leteckých dat s **menším a větším spektrálním rozsahem** pro detekci antropogenních materiálů podle vyhodnocené přesnosti.

Posledním z cílů této práce bylo **zpracování mapy antropogenních povrchů** zájmového území. Velmi důležitou součástí práce je hodnocení přesnosti klasifikací.

2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Letecká hyperspektrální data svým spektrálním a prostorovým rozlišením jsou vhodným nástrojem pro detekci antropogenních materiálů městského prostředí. Kategorie na leteckém snímku tvoří velmi malé objekty pravidelného tvaru s podobnými spektrálními vlastnostmi.

Tato kapitola se věnuje problematice vhodnosti hyperspektrálních dat pro detekci antropogenních materiálů, ale také jejich vlastnostem. A v neposlední řadě se zaměřuje na současný stav řešení sledované problematiky.

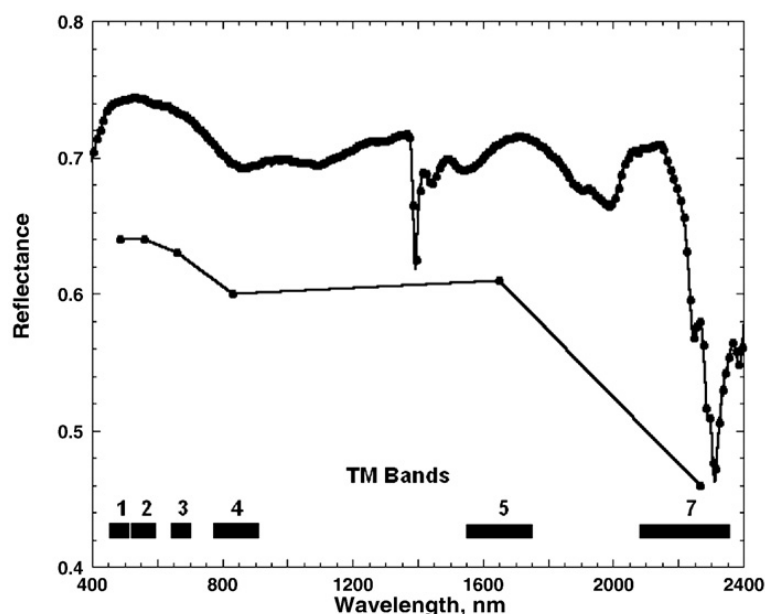
2.1 Vhodnost hyperspektrálních dat pro detekci antropogenních materiálů

Hyperspektrální data se pro detekci antropogenních materiálů používají přibližně od roku 2000. Mnohem častěji se vyskytují studie zkoumající vegetaci, geologické složení a využití krajiny z hyperspektrálních dat (Schiefer, Hostert, Damm, 2006). I sledování antropogenních materiálů má své opodstatnění. Nepropustné antropogenní materiály a jejich složení zapříčiňují mnohem větší pravděpodobnost záplav a znečištění (Ridd, 1995). Zastavěné oblasti mají obrovský dopad na okolí rozšiřujících se měst, ať už na zemědělskou půdu nebo přírodu, či na znečištění vzduchu a vody (McNeill, 2000, Cit. in Herold, Roberts, 2004). Mapování nepropustných povrchů je velmi cenné nejenom pro environmentální management (posuzování jakosti dešťových a stojatých vod), ale i pro budování infrastruktury a rozvoj měst (Weng, Hu, Lu, 2008). Neustále roste potřeba mapovat materiály střešních krytin pro zjištění potenciálního nebezpečí požáru či ztrát energie (Medina, 2000). Tyto materiály ve finále (v momentě jejich náhrady) často končí i na skládkách (CENIA, 2012). Města se velmi rychle rozrůstají a mění, proto je potřeba technologií, které umožní získávat informace o antropogenních materiálech z rozsáhlé části území, což data DPZ splňují (Herold, et al., 2004).

Před rozšířením leteckých hyperspektrálních senzorů byla pro detekci antropogenních materiálů využívána zejména multispektrální družicová data s vysokým prostorovým rozlišením a letecká data (Ben Dor, 2001; Heiden et al., 2007). Plochy tvořené antropogenními materiály ve srovnání s rozlohou přírodních ploch nejsou nikterak rozsáhlé, proto byla používána zejména data s vysokým prostorovým rozlišením, jako jsou IKONOS a Quickbird s rozlišením 4m, resp. 2,8 m (Herold et al., 2004), jelikož data s nižším prostorovým rozlišením (př. Landsat se 30 m) mají mnohem více smíšených pixelů (Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001). Nové možnosti pro získávání informace o antropogenních materiálech přinesly letecké hyperspektrální senzory, které jsou charakteristické vysokým prostorovým i spektrálním rozlišením (Heiden et al., 2007; Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001). Proto má obrazová spektroskopie obrovský potenciál pro sledování antropogenních materiálů (Ben Dor, 2001). Množství poskytnutých informací o chemickém a fyzikálním složení materiálů ovlivňuje také spektrální rozsah. V blízké a střední infračervené části spektra (NIR, SWIR) je obsaženo daleko více informací o materiálech než ve

spektru viditelném (VIS). Použitím vybraných metod obrazové spektroskopie je možné lépe charakterizovat informace i se subpixelovou přesností (Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001).

Multispektrální data jsou získávána v oblasti atmosférických oken pouze v několika spektrálních kanálech (viz Obr. 1). Spektrální kanály jsou u multispektrálních dat poměrně široké a oddělené. Spektrum jednoho kanálu je počítáno jako průměr z širší oblasti (např. 150 nm). Oproti tomu hyperspektrální senzory měří odrazivost v sérii úzkých navazujících kanálů (viz Obr. 1). Šířka kanálů u těchto dat se pohybuje od 5 do 10 nm (Shippert, 2003). U hyperspektrálních dat je navíc možné porovnat spektra jednotlivých pixelů v obraze se spektry měřenými v terénu a zjistit tak absorpce ve spektru (Goetz, 2009).



Obr. 1 Spektrum pořízené multispektrálním senzorem (dole) a spektrum pořízené hyperspektrální senzorem (nahore) (Zdroj: Goetz, 2009)

Všechny spektrální oblasti (VIS, NIR, SWIR, TIR- tepelné infračervené záření) umožňují detekci antropogenních materiálů městského prostředí. Pro získání podrobných informací o antropogenních materiálech jsou velmi důležité spektrální oblasti SWIR a TIR. SWIR obsahuje podstatné informace o minerálech a TIR o tepelných parametrech města. Oblasti VIS a NIR nesou sice jen minimální informace o antropogenních materiálech, ale vzhledem k nižším pořizovacím nákladům tohoto druhu dat jsou však neméně důležité (Ben Dor, 2001).

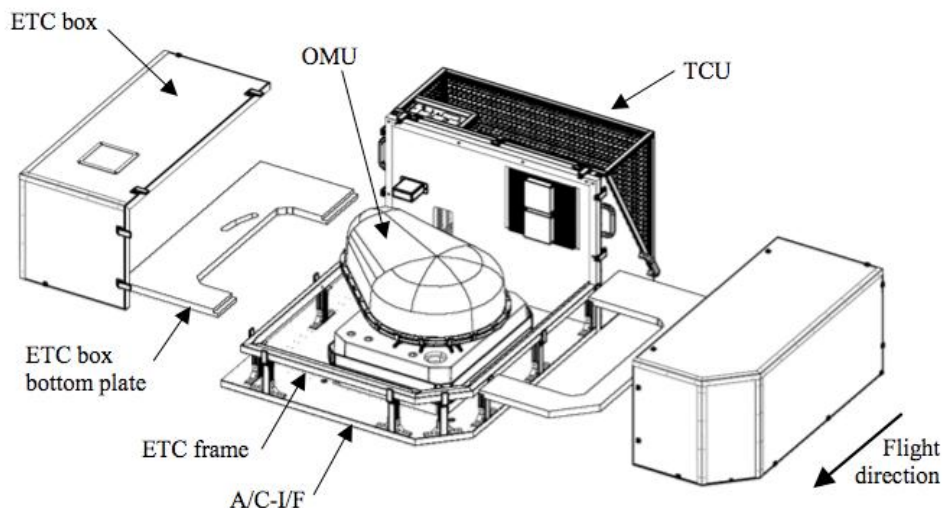
Konstrukce samotného senzoru ovlivňuje kvalitu výsledných dat, proto jsou společně se senzorem poskytovány informace o spektrálním rozlišení (FWHM), úhlu pohledu (FOV), aktuálním úhlu pohledu (IFOV) a kvantování. Pro detekci antropogenních materiálů je také podstatný kontrast mezi dvěma objekty na zemském povrchu, který je mimo jiné závislý na atmosférické situaci. Minimální vzdálenost mezi dvěma objekty, které je možné od sebe odlišit, udává „pozemní aktuální úhel pohledu“ (GIFOV) (Herold, et al., 2004).

Kvalita dat je dále ovlivňována geometrií odrazu. Výsledná odrazivost je závislá, jak na poloze Slunce v době snímání, tak i na pohledovém úhlu senzoru. To popisuje bi – direkcionální distribuční funkce odrazivosti (BRDF). Závislost orientace letu na azimutu Slunce může změnit nejen celkový jas ve snímku, ale i spektrální vlastnosti povrchu, což způsobuje dopředná a zpětná geometrie snímání. Spektrální závislost na BRDF je pro většinu antropogenních materiálů málo známá (Herold, et al., 2004). Navíc odrazivost objektů městského prostředí se složitě popisuje, protože zde dochází k mnohonásobným odrazům.

2.2 Hyperspektrální senzory AISA a APEX

Senzory AISA a APEX jsou letecké hyperspektrální senzory. Letecký senzor AISA je složen ze samotného senzoru, komponent, které zaznamenávají data, GPS/IMS jednotky a senzoru pro měření množství dopadajícího záření (irradiance) FODIS. Prostorové rozlišení pořízených dat se pohybuje mezi 0,4 – 6,0 m. Spektrální rozsah pásem je od 400 do 970 nm, tj. VIS a NIR. Data jsou snímána ve 244 spektrálních pásmech. Šířka jednoho spektrálního pásma je 2,9 nm. (GALILEO Group Inc., 2007).

Plán na vytvoření senzoru Airborne Prism EXperiment (APEX) vznikl v roce 1993. Realizovat se začal r. 1998 pod programem PRODEX (Programme pour le développement des éxperiments) Evropské kosmické agentury (ESA) za spolupráce Švýcarska a Belgie. Spektrální rozsah senzoru je 380 – 2500 nm ve 313 konfigurovatelných pásmech, v úplném spektrálním módu pak 534 spektrálních pásem. Prostorové rozlišení pořízených dat se pohybuje v rozmezí 2 – 5 m. Samotný přístroj se skládá se z několika jednotek. Jádrem celého senzoru jsou optické části (OSU), které obsahují citlivou optiku (FEE). Pro vyrušení externích vibrací slouží optické části na stabilizované platformě (STP). Platforma je kontrolována navigačním systémem, který obdrží informaci o orientaci od inerciální měřicí jednotky (IMU) a informaci o poloze od GPS. Tyto informace jsou synchronizovány s obrazovými daty v kontrolní a úložné jednotce (CSU). Data jsou ukládána na harddisk. Přístroj je teplotně a tlakově stabilizovaný. Optomechanická jednotka (OMU) je uzavřena v termálním kontrolním boxu (ETC). Termální řídicí jednotka (TCU) řídí teplotu chladících okruhů OMU a atmosféru v ETC boxu. SWIR detektory jsou chlazeny na teplotu -100°C, čímž je výrazně redukován tepelný šum přístroje. Rozhraní mezi letadlem a senzorem (A/C-I/F) umožňuje přepravu samotného senzoru během letecké kampaně (Itten, et al., 2008). Hlavní části senzoru jsou na Obr. 2.



Obr. 2 Části senzoru APEX (Zdroj : Itten et. al., 2008)

Světlo do spektrometru vstupuje přes zakřivenou šterbinu na kolimátor, který přesměruje světlo směrem k děliči (hranolu). Dělič/Hranol odděluje vlnové délky VIS a NIR (380 – 1000 nm) od SWIR (950 – 2500 nm). Viditelné a blízké infračervené záření (VNIR) dopadá na CCD (Charged Coupled Device) detektor, naopak SWIR je pomocí děliče směřován na CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) detektor. VNIR detektor může zaznamenat přes 335 pásem a SWIR detektor 199 pásem (Itten, et al., 2008).

2.3 Pozemní spektroradiometr

S pozemním spektroradiometrem lze pracovat přímo v terénu nebo v laboratoři.

Ideální podmínky pro získání spekter v terénu jsou v čase, kdy je Slunce nejvýše nad obzorem, tj. +/- 2 hodiny kolem poledne při jasné obloze. Rozsah akceptovatelného času (± 2 hodiny) je závislý na zeměpisné šířce, časovém období a frekvenci, ve které jsou objekty měřeny. Ve větších zeměpisných šířkách je během zimy akceptovaný rozsah menší, v létě větší. Měření odrazivosti pozemním spektrometrem by mělo probíhat za stejných podmínek jako při snímání leteckými a družicovými systémy (Herold et al., 2004). Během letu by měly být měřeny další veličiny, jako jsou teplota a vlhkost (Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001).

Nejmenší problémy při měření způsobují horizontální povrchy (silnice, chodníky a parkoviště). Množství potřebných měření závisí na variabilitě povrchu, tj. zda je povrch porušen či nikoliv, což odpovídá stáří daného materiálu (Herold et al., 2004). Vertikální a šikmé povrchy - pálené tašky či cihly přináší ještě jedno úskalí. Je nutné určit, zda bude měřeno spektrum několika pálených tašek či cihel, nebo pouze jedné z nich (Herold et al., 2004). Výstupem měření by nemělo být pouze spektrum bez dalších doplňujících informací. Proto jsou zjišťovány ještě metadata: GPS souřadnice měření, krátký popis materiálu, čas, den a další informace - stáří povrchu a jeho heterogenita atd. (Herold et al., 2004).

Spektroradiometr používaný pro účely této práce nese název FieldSpec4 Wide – Res spectroradiometer a má spektrální rozsah vlnových délek 350 – 2500 nm. Snímání zajišťují tři detektory, jeden pro oblast VNIR (350 – 1000 nm) a dva detektory pro SWIR (1000 – 1800 nm a 1800 – 2500 nm). Spektrální rozlišení (FWHM) spektroradiometru je 3 nm v oblasti VNIR a 30 nm v oblastech SWIR. Data jsou snímána ve 2151 pásmech (ASD Inc, 2013).

2.4 Vlastnosti antropogenních materiálů

Antropogenní materiály mají vzhledem ke svému unikátnímu chemickému složení velký potenciál pro mapování (Herold et al., 2004, 2004). Jsou tvořeny převážně malými objekty pravidelného tvaru (Ben Dor, 2001). Na malé ploše se tak vyskytuje velké množství unikátních materiálů, které vytváří vysokou spektrální různorodost na malém prostoru a jejichž definice je mnohdy nejednoznačná (Franke, et. al., 2009). Objekty městského prostředí můžeme rozdělit do dvou skupin:

- **přírodní objekty** (voda, půda a vegetace) a
- **člověkem vytvořené materiály** (budovy, bazény, cesty, dopravní prostředky atd.) (Ben Dor, 2001).

Výsledná odrazivost ve viditelné části spektra je dána převážně fyzikálními vlastnostmi objektů (stín, velikost, index odrazu) a zatímco absorpce ve spektru odpovídá spíše chemickému složení objektů. Ve regionu SWIR je absorpce kombinací vibračních procesů, v regionu VNIR způsobují absorpci elektronové procesy, které jsou relativně slabé (Hunt, 1997, Cit. in Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001).

Absorpční oblasti, které se vyskytují v regionu VNIR jsou způsobeny především obsahem chlorofylu (0,68 μm), oxidy železa a čistými barevnými pigmenty, které se vyskytují na antropogenních materiálech. Pigmenty mají ve viditelné části spektra různé spektrální chování (podle jejich barvy). Odrazivost antropogenních materiálů je tak ve výsledku směs chemických a fyzikálních vlastností (Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001).

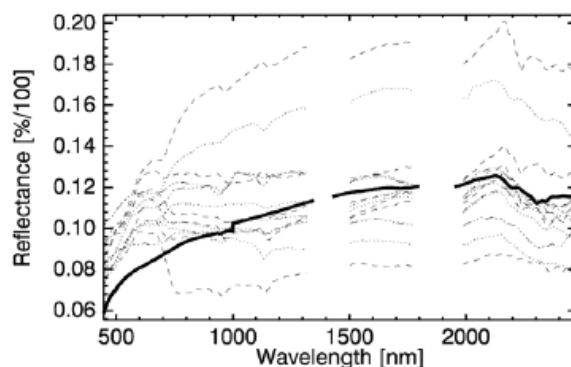
Některé objekty (kov a bazalt) mají v regionu VNIR naprosto odlišné spektrum, zatímco mezi betonem a žulou není možné pozorovat rozdíly. Další materiály obsahují specifické spektrální příznaky (vrcholy nebo absorpce). Příkladem může být červená cihla, která má specifické spektrální příznaky na vlnových délkách 0,55 μm , 0,67 μm a 0,89 μm (Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001).

V odborných studiích je uváděna rozdílná přesnost detekce antropogenních materiálů na různé úrovni především kvůli rozdílům v přesnosti klasifikace či v množství detekovaných materiálů. Vše závisí na kvalitě pořízených dat, jejich spektrálním rozsahu, zvoleném klasifikačním algoritmu a v neposlední řadě také na kvalitě atmosférické korekce a hlavně na samotném zpracovateli. Příkladem mohou být Ben Dor, Levin, Saaroni (2001), kteří detekovali antropogenní materiály jako asfalt, beton a tři druhy střešních krytin. Podrobnější data s větším počtem spektrálních kanálů byla použita ve studii Heiden, et. al. (2007). Autor zde rozlišoval typy střech, komunikací a částečně propustných materiálů. Střechy byly rozděleny na minerální

(pálené tašky, beton, štěrk, břidlice), plechové (hliník, zinek, olovo, měď) a uhlovodíkové (bitumen, lepenka, polyvinyl, polyetylen, polyisobutylene). Povrchy komunikací tvořily třídy beton a asfalt. Za částečně propustné povrchy byly považovány dlažební kostky, chodník z betonu a odštěpky různých materiálů.

2.4.1 Asfalt, beton, štěrk a další materiály

Asfaltový povrch se skládá z úlomků hornin a směsi asfaltu. Minerální složka rozdrcených kousků horniny je závislá na geologickém regionu, ale obvykle dominují hlavní komponenty oxid křemičitý (SiO_2), oxid vápenatý (CaO) a oxid hořečnatý (MgO). Směs asfaltu se skládá z ropy, asfaltenu a pryskyřice. Z chemického složení jsou nepostradatelné směsi uhlovodíků, které jsou tvořeny 50 – 1000 uhlíkovými atomy a vodíkem, kyslíkem, sírou či dusíkem. Spektrální odrazivost nového asfaltu je velmi nízká. Množství uhlovodíků ovlivňuje velikost (hloubku, šířku) absorpce. Minimum odrazivosti je v blízkosti 350 nm. Odrazivost pak roste do vyšších vlnových délek téměř lineárně (Herold, 2004, Heiden, et. al. 2007). Ve spektru se projevuje zřejmá absorpce v oblasti SWIR v blízkosti 1850 nm a 2350 nm (Nasarudin, Shafri, 2011) (viz Obr. 3). Další podstatné absorpční pásmo je okolo 1700 nm (Herold, 2004). U staršího asfaltu je pozorovatelná vyšší odrazivost kolem 850 nm. Stav asfaltu prostřednictvím hyperspektrálních dat zkoumali Mohammadi, Hahn, Engels (2011), kteří uvádějí, že kvalitní asfalt má nižší odrazivost ve VIS a výraznější absorpci v rozmezí vlnových délek 2120 – 2340 nm oproti méně kvalitnímu asfaltu. Studie Ben Dor, Levin, Saaroni (2001) uvádí, že tmavé objekty, jako jsou asfalt a bazalt jsou charakteristické nízkou odrazivostí bez specifických absorpčních příznaků ve spektrálním regionu VNIR.

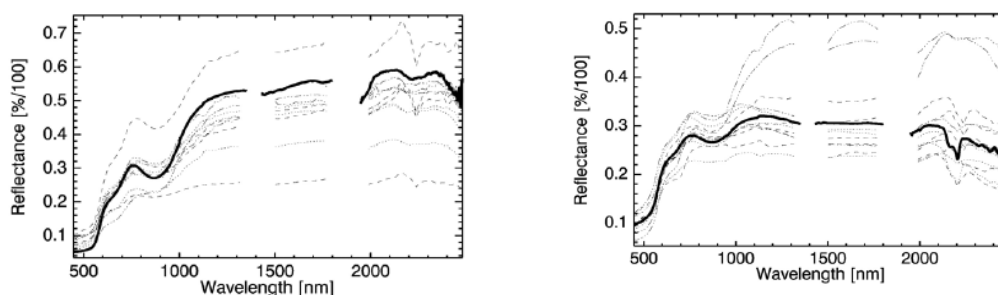


Obr. 3 Spektrální křivka asfaltu (Heiden, et. al., 2007)

Betonové povrchy se skládají z cementu, písku, vody a mnoha dalších komponent. Hlavní absorpční pás odpovídá hydroxidu vápenatému $\text{Ca}(\text{OH})_2$, konkrétně vlnovým délkám 2300 nm pro kalcit a 2370 nm pro dolomit. Pokud se ve spektrální křivce vyskytuje absorpce na vlnové délce 2170 nm, pak je v betonu přítomen jíl (Rashed, Jürgens, 2010). V poškozeném betonu mohou být obsaženy i sloučeniny, jako je uhličitán vápenatý (CaCO_3), chlorid sodný (NaCl) a síran vápenatý ($\text{Ca}_2(\text{SO}_4)$). Vlnové délky, které by mohly odpovídat degradaci betonu, jsou kolem 440 nm, 1393 nm, 1930 nm, 2127 nm a 2340 nm (Arita, et al., 2001). Odrazivost staršího

betonu je vyšší než odrazivost nového a reflektance stoupá do delších vlnových délek (Nasarudin, Shafri, 2011). Průměr a směrodatná odchylka spektrální odrazivosti jsou vhodné pro odlišení materiálů, které nemají téměř žádné absorpční příznaky, př. asfalt a beton (Heiden, et al., 2007).

Štěrky se nejčastěji vyskytuje jako součást povrchu komunikací. Je tvořen minerály, které ukazují na specifické absorpční pásy. Pro křemičitany je typický pás kolem 2200 nm, stejně jako pro hydrokarbonáty. Oxidy železa se projevují ve VNIR - 520 nm, 670 nm a 870 nm (Herold, et al., 2004). **Odštěpky různých materiálů**, které tvoří povrch komunikací, mají podobné spektrální vlastnosti jako červené pálené střešní tašky (viz Obr. 4).



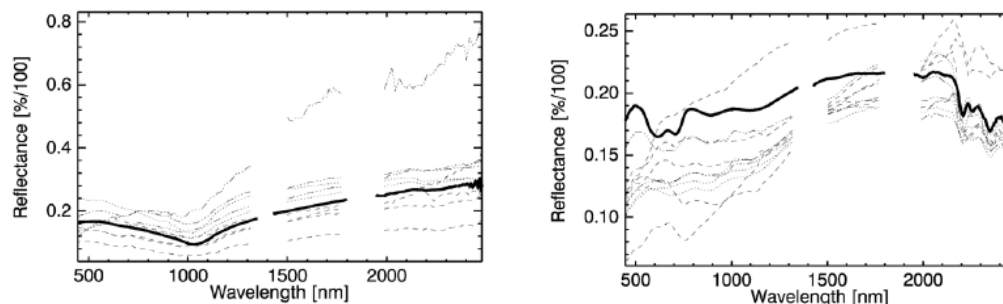
Obr. 4 Spektrální křivka střešní tašky (vlevo) a červených úlomků (vpravo) (Zdroj : Heiden, et. al. 2007)

Pozice absorpčních pásů je u červených úlomků mírně posunuta do větších vlnových délek a je charakteristická absorpcí kaolinitu kolem 2134 a 2272 nm. Celková odrazivost je však nižší. Tyto materiály jsou odlišovány pomocí SWIR. U odštěpků různých materiálů dochází ve SWIR k větší absorpci vody. Záměna je možná v případě starší střešní krytiny, která má nižší odrazivost (Heiden, et al. 2007). Spektrum **červené cihly** je specifické oxidy železa (Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001). Červené cihly mají velmi podobnou odrazivost jako červené pálené střešní tašky.

2.4.2 Střešní krytiny

Stáří střech ovlivňuje spektrální vlastnosti, proto je vhodné rozlišovat střechy nové a staré (Nasarudin, Shafri, 2011). Střešní krytiny jsou také typické vysokou variabilitou ve viditelném a blízkém infračerveném spektru (Heiden, et al., 2007, Herold, et al., 2004).

Na **plechové střechy** se používají různé typy kovů: hliníkový plech, měděný plech, nerezová ocel, pozinkovaný (viz Obr. 5) a titan-zinkový plech. Podle typu kovu se liší i jednotlivé spektrální charakteristiky. Hliníkové plechy se projevují absorpčním pásmem na vlnové délce 840 nm, kdežto pozinkované plechy mají podobnou absorpci na vlnové délce 1020 nm (Herold, et al., 2004; Heiden, et al., 2007). Spektrální křivka zinku také ukazuje absorpci na 550 nm. Odrazivost nového plechu natřeného tmavě modrou barvou je poměrně vysoká v NIR i SWIR regionu a nejnižší odrazivost vykazuje mezi 500 a 850 nm (Nasarudin, Shafri, 2011).



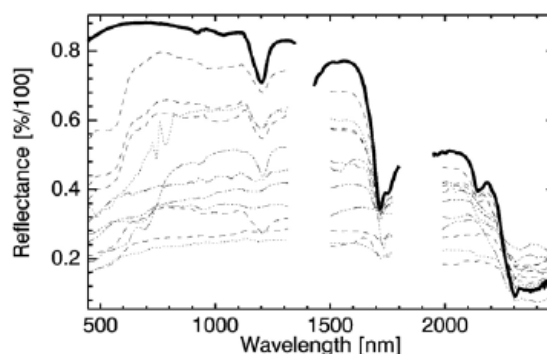
Obr. 5 Spektrální odrazivost zinku (vlevo) a bitumenu (vpravo) (Zdroj : Heiden, et. al. 2007)

Spektrální odrazivost střešní krytiny z **bitumenu** je znázorněna na Obr. 5. Mezi vlnovými délkami 1159 a 1709 nm se jeví jako téměř konstantní, klesající je potom mezi 2116 – 2203 nm. Specifická absorpce se objevuje na vlnových délkách 2151 – 2221 nm, 2289 – 2402 nm; dále potom také mezi 1024 – 1259 nm (Herold, et al., 2004).

Pálené střešní krytiny jsou tvořeny směsí cihlářské hlíny, jílu a vody. Je pro ně typický nárůst odrazivosti v blízké a střední infračervené části spektra. V kratších vlnových délkách (520, 670 a 870 nm) se projevují absorpční pásy oxidů železa (Herold, et al., 2004). Jsou z podobného materiálu jako červené úlomky (viz kap. 2.5.1); pálená střešní krytina má však vyšší odrazivost (Heiden, et al. 2007).

Lokální maxima odrazivosti (peaky) určují rozdíl mezi **červenou betonovou střešní krytinou** a **červenou střešní taškou**. Oba materiály jsou typické dvěma silnými absorpcemi ve VIS (445 – 622 nm) a NIR (743 – 1130 nm) regionu, které jsou dány přítomností oxidů železa. Výsledkem silné absorpce červené betonové střešní krytiny je lokální maximum odrazivosti mezi 862 nm a 880 nm (Heiden, et al. 2007). Dalším materiálem využívaným jako střešní krytina jsou **břidlice**, které mají velmi nízkou odrazivost a podobné spektrální vlastnosti jako asfalt. Neobsahují téměř žádné specifické absorpční pásy (Rashed, Jürgens, 2010).

U **plastových střech** je dominantní C – H (uhlovodíková) absorpce na 2200 nm. Polyetylen (Obr. 6) vykazuje vysokou odrazivost s významným absorpčním pásem na 1200 nm a 1700 nm, který je vyvolán vibračními procesy uhlovodíku (Pieters, Englert, 1993 cit. in Heiden, et al. 2007). Další absorpce se objevuje na 2170 nm. Následně odrazivost prudce klesá (2200 nm) až směrem k silnému absorpčnímu pásu na 2300 nm (Cloutis, 1989 cit. in Heiden, et al., 2007). Všechny absorpční pásy není možné určit u všech typů střech, jelikož spektrální odrazivost se také liší podle jejich barvy (Heiden, et. al, 2007). Nové polykarbonátové střechy (termoplast) vykazují rostoucí odrazivost směrem do větších vlnových délek a ve SWIR regionu se objevuje absorpce (Nasarudin a Shafri, 2011).



Obr. 6 Spektrální křivka polyethylenu (zdroj : Heiden, et. al. 2007)

Tab. 1 udává souhrn oblastí absorpčních pásem zjištěných u vybraných antropogenních materiálů.

Tab. 1 Absorpční pásma vybraných antropogenních materiálů (zdroj: vlastní zpracování)

Materiál	Absorpční pásmo [nm]	
	VIS-NIR	SWIR
asfalt	850	1850, 2350, 1700
beton	440	2300, 2370, 2170
šterk	520, 670, 870	2200
hliník	840	-
zinek	1020, 550	-
bitumen	-	2151-2221, 2289 - 2402, 1024 - 1259
pálená taška	520, 670, 870	2134, 2272
polyetylen	-	1200, 1700, 2170, 2300

2.5 Současný stav a potíže při detekci antropogenních materiálů

Institucí, které se věnují problematice detekce antropogenních materiálů v městském prostředí z hyperspektrálních dat, není ve světě mnoho. Převážná část z nich sídlí v Německu a ve Spojených státech amerických. V různých oblastech světa je tato problematika na různé úrovni, proto i výsledky jsou značně různorodé. Většina studií se ale shodla na potížích, které samotná detekce těchto materiálů přináší.

2.5.1 Data a spektrální knihovna

Ve většině výše popsaných studií byla použita hyperspektrální letecká data ze senzorů HyMap (Heiden et al., 2007 a Greiwe, Ehlers, 2007), CASI (Ben Dor, 2001 a Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001), DAIS 7915 (Plaza et al., 2004). V několika pracích se objevuje kombinace multispektrálních družicových dat (WorldView – 2) a dat z pozemního měření spektrometrem (Nasarudin, Shafri, 2011). Antropogenní materiály jsou pomocí DPZ zkoumány převážně v Německu (Heiden et al., 2007), Izraeli (Ben Dor, 2001a Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001), Severní Americe (Herold et al., 2004 a Herold, 2004), Itálii (Plaza et. al., 2004) a v Malajsii (Nasarudin, Shafri, 2011).

Studie, které se týkají charakteristik odrazivosti a spektrálních příznaků, jsou obvykle závislé na spektrálních knihovnách. Ty obsahují čisté spektrální křivky daných materiálů (Nasarudin, Shafri, 2011), které jsou získávány sběrem ze samotného snímku (Franke, et. al, 2009). Spektra však nejsou čistá, ale jsou ovlivněna atmosférickou situací na daném místě v určitý čas; vzorky nemusí být dostatečně reprezentativní. Dále je možné využít existující spektrální knihovny (Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001). Pro každý region je však typický jiný antropogenní povrch střech či komunikací; jeho složení závisí na geologických, klimatických dalších faktorech. V České republice není možné použít existující spektrální knihovny z odlišných částí světa. Další možností je vytvořit vlastní spektrální knihovnu z dat pozemního měření, jako např. Cavalli, et al., 2008; Herold, 2004; Nasarudin, Shafri, 2011. Nutností je dostatečný počet měření, aby byla zajištěna reprezentativnost dat a některé typy antropogenních povrchů nebyly vynechány.

Prince vytvořil v roce 1995 první spektrální knihovnu antropogenních materiálů (Cit. in Heiden, 2007 a Ben Dor, 1999). Jak už bylo zmíněno výše, Ben Dor, Levin, Saaroni (2001) použili stávající spektrální knihovnu Prince (1995). Původní data převzorkovali na 48 kanálů, které odpovídaly počtu kanálů senzoru CASI a uložili je do databáze „Pure Urban Spectral Library“ (PUSL). Vlastní spektrální knihovny antropogenních materiálů byly vytvořeny v severoamerických městech Santa Barbara a Goleta v Kalifornii (Herold, 2004). Další spektrální knihovna, která vznikla z dat pozemního měření, byla vytvořena Cavalli, et al. (2008). Specifická spektrální knihovna antropogenních materiálů byla vytvořena v Malajsii. Jednalo se o spektra materiálů nacházejících se v univerzitním kampusu (Nasarudin, Shafri, 2011). Spektra ze samotného snímku použil Franke, et al., (2009). Ve studii Heiden, et al. (2007) zkoumali následující spektrální příznaky: absorpční pásy, vrcholy odrazivosti, jas, spojitost či rostoucí a klesající trend spektrální křivky- Data poté byla statisticky zpracována pomocí výpočtu průměru, směrodatné odchylky spektra, plochy, hloubky a pozice absorpčního pásu a velikostí lokálního maxima.

2.5.2 Předzpracování obrazu

Většina studií se lišila v použité **atmosférické korekci**. Franke, et al. (2009) aplikoval atmosférický model ATCOR 4 a odstranil pásma s velkým šumem (1400 nm a 1900 nm).

FLAASH modul, který je implementován v prostředí softwaru ENVI, byl použit v Greiwe, Ehlers (2007). Nejvhodnější atmosférický model vybírali Ben Dor, Levin, Saaroni (2001) srovnáním spekter ze snímku po atmosférické korekci se spektry z pozemního měření. Testovány byly dvě empirické metody: Internal Apparent Reflectance Ratio (IARR), Empirical Line (EL); dva atmosférické modely: Moderate Resolution Atmospheric Transmission (MODTRAN), Atmosphere Removal Algorithm (ATREM) a hybridní modely: MODTRAN s metodou EL a ATREM s metodou EL. Ben Dor, Levin a Saaroni (2011) stanovili jako nejvhodnější atmosférický model ATREM s metodou EL. Hybridní model MODTRAN s metodou EL byl použit ve studii Heiden, et al. (2007) a hybridní model FLAASH a metoda EL ve studii Cavalli, et al. (2008).

V městské zástavbě je snadno identifikovatelný tmavý a světlý cíl, proto Rashed a Jürgens (2010) uvádějí jako nejvhodnější metodu atmosférické korekce metodu EL, která s těmito cíli pracuje. Zároveň však dodávají informaci, že metoda EL lineárně rozkládá radiometrické zkruslení, proto je snímek potřeba upravit za pomoci aerosolových modelů a odstranit pásy vodní absorpce. Nejméně častý způsob atmosférické korekce, možný pouze u leteckých dat, je použití dat pořízených během snímkování (Cavalli et al., 2008).

Ve zkoumaných studiích byly také využity odlišné přístupy ke **geometrické korekci**. Heiden et. al, (2007) a Greiwe, Ehlers (2007) použili inerciální navigační systém a digitální model terénu pro geokódování snímku v systému PARCE. Bing Peng (2007) a Cavalli et al. (2008) georeferencovali snímek pomocí vřícovacích bodů. Rashed, Jürgens (2010) geokodovali snímky pomocí katastrálních map a dat s vysokým prostorovým rozlišením.

Výsledky z pozemního měření byly k místu přiřazovány prostřednictvím topografické mapy 1 : 25 000 ve studii Heiden, et al. (2007). Ti také použili pro následné **převzorkování obrazu** metodu nejbližšího souseda. Nevýhodou této metody je, že nezachovává geometrický tvar, ale oproti tomu nejméně zkrusluje spektrální informaci, což je velmi důležité zejména při nižším prostorovém rozlišení.

2.5.3 Metody detekce antropogenních materiálů

Jedním z obecně uváděných způsobů detekce antropogenních materiálů městského prostředí ze snímku, je Vegetation – Impervious – Soil (V – I – S) model (Ridd,1995). Ten odpovídá chemickým a fyzikálním vlastnostem objektům městského prostředí (Ben Dor, 2001). Umožňuje vytvoření nehomogenních tříd na základě procentuálního zastoupení vegetace, nepropustných materiálů a půdy (Ridd,1995). Kromě V – I – S modelu je také uváděna hierarchická klasifikace o čtyřech úrovních (Anderson, et al., 1976), zejména pak třetí a čtvrtá úroveň modelu, které mají vysoký potenciál identifikovat konkrétní materiály (Herold, 2004).

Sousední spektrální pásma hyperspektrálních dat trpí vysokou mírou autokorelace, která přináší redundantní informace. Standardním krokem před samotnou analýzou tak je transformace dat. Široce používanou metodou je Minimum Noise Fraction (MNF), která pracuje na základě analýzy hlavních komponent (PCA). Výsledkem je obraz s minimálním šumem (Rashed, Jürgens, 2010).

Výběr metody klasifikace je důležitým faktorem, který ovlivňuje její přesnost. Existují klasifikační algoritmy, které jsou citlivé na světelné efekty. Mezi takové patří **Spectral Angel Mapper (SAM)** (Rashed, Jürgens, 2010). Ve studii Greiwe a Ehler (200?) byla metoda SAM součástí klasifikace antropogenních materiálů založené na fúzi dat. SAM je také algoritmus, který umožňuje porovnat spektra obrazu se spektry pořízenými v terénu. Toho využili Nasarudin, Shafri (2011), když srovnávali obrazová multispektrální data s daty z pozemního spektrometru.

Zástavbu na snímku tvoří malé objekty pravidelného tvaru. V mnoha případech se proto na území odpovídajícímu jednomu pixelu vyskytuje více materiálů. Jednotlivé materiály je možno identifikovat metodami subpixelové analýzy. Patří mezi ně **Spectral Mixture Analysis (SMA)**, **Linear Spectral Unmixing (LSU)**, **Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF)**, **Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA)** (Rashed, Jürgens, 2010).

Linear Spectral Unmixing (LSU) byl použit ve studii Plaza, et al. (2004), která byla zaměřena na výpočet čistoty pixelu pomocí morfologických filtrů:

- Automated Deremination of Morphological Profiles (ADMP) a
- Automated Determination of Scale – Orientation Morphological Profiles (ADSOMP).

Principem ADMP a ADSOMP je aplikace morfologických filtrů „otevření“ a „uzavření“ na snímek. Pixel, který se při uzavření nezmění a je nahrazen při otevření, je čistý. Pixel, který se při otevření nezmění a je nahrazen při uzavření, je smíšený. Plaza, et al. (2004) uvádí, že tento postup je vhodný, pokud je třeba zachovat malé objekty obrazu, jako jsou budovy. Také uvádí jeho vhodnost pro scény se zastoupením podobných materiálů na snímku a pro data s nízkým prostorovým rozlišením.

Částečnou subpixelovou analýzu provádí **Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF)**. Je založen na porovnávání spekter, čímž umožňuje detekci specifických materiálů. Klasifikátor maximalizuje odezvu známých koncových členů a naopak potlačuje neznámé pozadí (Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001). Franke, et al. (2009) použili ve své studii klasifikační algoritmus **Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA)**. Pro lepší přesnost klasifikace aplikoval hierarchický přístup, který umožňuje prostorové omezení (Franke, et al., 2009).

Koetz, et al. (2008) uvádí, že pro klasifikaci antropogenních materiálů jsou vhodné neparametrické klasifikátory: **neuronové sítě (neural network)**, **rozhodovací stromy (decision tree)** a **support vector machine (SVM)**. Výběr zdůvodňuje heterogenitou tříd antropogenních materiálů, pro které není vhodné používat klasifikační algoritmy pracující na principu statistického rozdělení. Klasifikátor SVM je závislý na trénovacím souboru, do kterého je třeba zahrnout i smíšené pixely (Koetz, et al., 2008).

Jiné studie uvádí, že algoritmy statistického rozhodování jsou vhodné pro překrývající se příznaky tříd (ITT Visual Information Solution, 2012). Mezi ně patří klasifikátor **Maximum Likelihood classification (MLC)**, který byl použit společně s klasifikátorem SAM ve studii Greiwe a Ehler (200?).

2.5.4 Výsledky a současné řešení sledované tematiky

Přehled studií a v nich použitých senzorů, klasifikačních algoritmů, počet koncových členů a celková přesnost klasifikace jsou uvedeny v Tab. 3. Problematice klasifikace dat s nižším spektrálním rozsahem se věnovali Koetz, et. al. (2008) a Ben Dor, Levin, Saaroni (2001).

Ben Dor, Levin, Saaroni (2001) klasifikovali data senzoru CASI pomocí MTMF. Detekovali ze snímku pouze tři antropogenní povrchy: asfalt, beton a střechy natřené na bílo. Mezi ostatní klasifikované třídy patřily: Yakon River, písčité půdy, tráva, hnědá půda, jezero, vegetace a stín. Nejvíce byla zaměňována třída písečná půda za světlý beton. Některé střechy natřené na bílo byly klasifikovány jako asfalt, jelikož mají podobnou odrazivost jako asfalt pokrytý prachem. Sedadla na stadionu byla klasifikačním algoritmem určena jako betonová, ačkoliv jsou ze směsi barevných plastů a betonu. Celková přesnost klasifikace byla 76 %.

Koetz, et al. (2008) použili data ze senzoru AISA – Eagle a klasifikační algoritmus SVM. Pro zvýšení přesnosti klasifikace autoři využili informace o výšce z lidarových dat a hierarchický přístup o třech úrovních. Na první úrovni byly klasifikovány tři třídy a z nich na druhé úrovni další podtřídy (viz Tab. 2).

Tab. 2 První dvě úrovně hierarchického modelu (Koetz, et al., 2008)

První úroveň	Druhá úroveň
Zastavěné území	Střecha
	Komunikace
	Sportoviště
Vegetace	nižší než 30 cm
	Keř
	Strom
Vodní plocha	Bazén
	Přírodní vodní plocha
Holý povrch	Holá půda
	Skála

Na třetí úrovni rozdělili třídy střecha a komunikace na další podtřídy. Výstupem bylo 9 tříd antropogenních materiálů: dřevěný šindel, pálená taška, plechová střecha, betonová střecha, asfaltová, betonová a šterková komunikace, parkoviště a tartanová dráha. Zastíněné povrchy, zejména střešní krytiny a bazén, byly často klasifikovány jako jiná třída. Zaměňovány byly především třídy šterková komunikace a skála, které jsou tvořeny stejným materiálem. Celková přesnost klasifikace byla 75,4 %.

Čtyřstupňový hierarchický přístup klasifikace byl použit ve studii Franke, et al. (2009). Snímek pořízený senzorem HyMap byl klasifikován metodou MESMA. Na čtvrté úrovni bylo odlišeno 20 tříd, z nichž třináct tvořily antropogenní povrchy: asfalt, dlažební kostka, červený šindel, tmavý šindel, došek, zkorodovaná plechová střecha, plechová střecha, bitumenová střecha, břidlicová střecha, skleněná střecha, střecha auta a dva typy plastových střech. Přesnost klasifikace autoři vylepšili na základě stanovené max. Root mean square error (RMSE) pro holou půdu na 0,025, čímž ji odlišili od třídy červený šindel. Nízkofrekvenčním filtrem vyřešili osamocené pixely objevující se v obraze individuálně, nebo uvnitř budov. Zaměřovány byly materiály asfalt, tmavý šindel, a kovová střecha. Franke, et al. (2009) jako důvod uvádí, že mají nízkou odrazivost a nedostatek absorpčních pásem. Celková přesnost této klasifikace byla 75,9%.

Greiwe a Ehlers (2007) použili pro klasifikaci antropogenních materiálů ortofoto, digitální model povrchu a data senzoru HyMap. Kombinací objektové klasifikace, využití neuronových sítí a metody SAM vzniklo celkem 12 tříd střech, třída vodní plocha a třída vegetace. Jednu třídu tvořila holá půda a povrchy komunikací. Celková přesnost klasifikace byla 73,3 %.

Plaza, et al. (2004) porovnávali výsledky klasifikace metodou LSU na základě použití morfologických filtrů ADSOMP a ADMP. Jako referenční spektrum do této klasifikace vstupovaly čisté pixely získané pomocí těchto morfologických filtrů. Výsledkem bylo 9 tříd a z toho čtyři třídy tvořily antropogenní materiály: asfalt, parkoviště, bitumen a střecha. Přesnost klasifikace za použití ADMP byla 82 % a za použití ADSOMP 89%.

Nasarudin a Shafri (2011) použili ve své studii pro klasifikaci multispektrálního snímku WorldView – 2 data z pozemního měření. Snímek klasifikovali metodou SAM. Výsledné třídy byly: azbest, asfalt, betonová dlaždice, keramická dlaždice, betonová střecha, plechová střecha, půda, tráva, stromy a vodní plochy. Celková přesnost klasifikace byla 31,2 %. Na stejný snímek aplikovali metodu MLC. Vstupními daty byly trénovací plochy ze snímku. Jako trénovací plochy použili totožné objekty, které měřili v terénu. Přesnost klasifikace MLC byla 73,34 %. Nasarudi a Shafri (2011) tak uvádí, že pro klasifikaci multispektrálního obrazu není možné použít data pozemního měření.

Masku budov z topografických dat aplikovali ve studii Heldens et al. (2007), kteří klasifikovali data HyMap pomocí metody LSU. Maskou budov zajistili lepší oddělitelnost tříd povrchu komunikací a střešních krytin. Výsledkem bylo celkem 19 tříd, z toho 13 tříd tvořily následující antropogenní povrchy: pálená taška, betonová taška, plechová střecha, bitumenová střecha, skleněná střecha, střecha pokrytá vegetací, šindel, beton, asfalt, tartan, dlažba, železniční koleje a odštěpky různých materiálů. Přesnost klasifikace autoři neuvádějí.

Mohammadi, Hahn, Engels (2011) se zabývali klasifikací komunikací z hyperspektrálních dat. Pro klasifikaci použili data ze senzoru HyMap a klasifikační algoritmus SAM. Klasifikaci omezili pomocí vektorové vrstvy pouze na síť komunikací. Odlišovali materiály asfalt, šetřek a beton. Přesnost klasifikace ve studii nezmiňují. Pouze uvádějí, že 66 % pixelů povrchu nebylo klasifikováno. Věnovali se také klasifikaci stavu asfaltu. Rozlišovali tři typy: dobrý, středně špatný a špatný asfalt. Ve studii opět není uvedena přesnost klasifikace.

Cavalli et. al. (2008) porovnávali klasifikace z multispektrálních dat a hyperspektrálních dat. Použili data ze senzorů Hyperion, Ali, ETM+ a MIVIS. Na multispektrální data ze senzoru Ali, ETM+ a IKONOS aplikovali metodu SAM a na hyperspektrální data Hyperion a MIVIS aplikovali metodu LSU. Klasifikovali celkem 9 tříd, z nichž 4 tříd tvořily antropogenní materiály: dlaždice, plast, asfalt a kamenná dlažba. Autor neuvádí celkovou přesnost klasifikace.

Tab. 3 Přehled výsledků sledované tematiky (zdroj: vlastní zpracování)

Autor	Území	Senzor	Prostorové/ Spektrální rozlišení	Klasifikační algoritmus	Spektrální knihovna	Koncové členy		Celková přesnost [%]
						Celkem	Ant. materiály	
Koetz, et al. (2008)	Aix – en – Provence	AISA – Eagle	1 m / 400 – 970 nm	SVM	Snímek	16	9	75,4
Ben Dor, Levin, Saaroni (2001)	Tel Aviv	CASI	3,5 m / 430 – 940 nm	MTMF	Snímek	10	3	76
Franke, et al. (2009)	Bonn	HyMap	2,5 m / 450 – 2480 nm	MESMA	ASD FieldSpec Pro	20	13	75,9
Greiwe a Ehlers (200?)	Osnabrück	HyMap	4 m / 400 – 2500 nm	SAM a Neuronová síť	Snímek	15	13	73,3
Plaza, et al. (2004)	Pavia	DAIS 7915	5 m / 400 – 12300 nm	LSU	Snímek	9	4	ADMP (82), ADSOMP (89)
Nasarudin a Shafri (2011)	Kuala Lumpur	WorlView-2	0,5 – 1 m / 400 – 1040 nm	MLC a SAM	FieldSpec3	10	6	SAM (31,2) a MLC (73,32)
Heldens et al.	Mnichov	HyMap	4 m / 400 – 2500 nm	LSU	Snímek	19	13	–

Autor	území	Senzor	Prostorové/ Spektrální rozlišení	Klasifikační algoritmus	Spektrální knihovna	Koncové členy		Celková přesnost [%]
						Celkem	Ant. materiály	
Mohammadi, Hahn, Engels (2011)	Ludwigsburg	HyMap	4 m / 400 – 2500 nm	SAM	Snímek	3	3	–
Cavalli, et al. (2008)	Benátky	Hyperion	30 m/ 400 – 2500 nm	LSU	Pozemní spektrometr	9	4	–
		Ali,	10 – 30 m / 400 – 2400 nm	SAM				
		ETM+,	30 m / 400 – 1250 nm	SAM				
		MIVIS	8 m / 400 – 12700 nm	LSU				
		IKONOS	1 m / 400 – 700 nm	SAM				

3 POUŽITÁ DATA A METODIKA

V této kapitole jsou podrobně popsána použitá vstupní data a podmínky při jejich pořízení. Dále pak je zde rozebrána metodika zpracování klasifikace a detekce antropogenních materiálů od vytvoření spektrální knihovny, přes úpravu vstupních dat, tvorbu masek antropogenních materiálů, samotnou klasifikaci až k hodnocení přesnosti.

3.1 Modelová území

V práci byla použita data z oblasti Krkonošského národního parku (dále jen KRNP) pořízená hyperspektrálním senzorem APEX. Modelová území byla zvolena v oblasti západních Krkonoš, ve východní části Libereckého kraje. Konkrétně byly vybrány snímky tvořené z velké části městskou zástavbou, na nichž se nachází města Rokytnice nad Jizerou a Harrachov. Kritériem výběru byla velikost obce a rozmanitost v zastoupení antropogenních povrchů. Obě dvě města splnila stanovené podmínky.

Stav antropogenních povrchů je výrazně ovlivňován teplotou a množstvím dešťových a sněhových srážek. Průměrná roční teplota na území KRNP je + 4, 9°C, v letních měsících se pohybuje kolem 14 °C. Nejvyšší množství srážek zde spadne v letních měsících, naopak nejnižší srážkové úhrny jsou v této oblasti na jaře. V obou městech za rok v průměru spadne 1400 – 1600 mm srážek (ČHMÚ, 2012). V nižších polohách leží sníh 70 – 120 dní v roce. Destrukci povrchu komunikací a střešních krytin způsobuje zejména mráz, tající sníh a dešťové srážky; v menší míře pak zemní laviny vzniklé na základě přívalemových dešťů (Správa KRNP, 2010).

Kromě fyzicko-geografických podmínek má na stav komunikací a střešních vliv i sociální prostředí. Hlavní příjmy v oblasti Krkonoš pramení z cestovního ruchu. Ostatní hospodářská odvětví nejsou příliš výnosná, což vede k obecně špatné ekonomické situaci (Český statistický úřad, 2012). Ta společně s fyzicko-geografickými podmínkami determinuje nízký počet obyvatel v regionu. Rokytnice nad Jizerou měla v roce 2012 (stav k 31. 12. 2012) celkově 2890 obyvatel a Harrachov 1532 obyvatel (Český statistický úřad, 2012). Ekonomická situace je také příčinou výskytu starších materiálů střešních krytin: IPA, Alukryt a eternit. V Krkonoších se nenachází kvalitní dopravní síť (Regionální rozvoj Krkonoš, 2012). Žádným z modelových měst neprochází transitní silnice. K 18. 7. 2013 bylo v Rokytnici nad Jizerou registrováno celkem 1990 automobilů (stav k 18. 7. 2013), v Harrachově pak 832 (MVČR, 2013). Intenzita dopravy se zvyšuje pouze v zimních měsících.

Druhým zájmovým územím bylo rovinaté Polabí. Z polabského regionu bylo pro analýzu vybráno město Čáslav ve východní části Středočeského kraje, pro nějž byla k dispozici data ze skeneru AISA. Charakter jeho území je oproti Krkonošům diametrálně odlišný. Město není protaženo podél hlavní komunikace, ale tvoří ho síť hlavních a vedlejších silnic na sebe kolmých. Město je souměrné do všech světových stran.

Průměrná roční teplota se v okolí Čáslavi pohybuje v rozmezí 8 – 9 °C, tj. jedná se o jednu z nejteplejších oblastí Česka (ČHMÚ, 2013). V Čáslavi za rok spadne v průměru 521 mm srážek (Střední Čechy, 2003). Klimatické podmínky v Čáslavi jsou příznivější než v Krkonoších, v důsledku čehož nemají takový vliv na stav střešních krytin a komunikací.

Ke konci roku 2012 žilo v Čáslavi 10 138 obyvatel, což je podstatně více než v Rokytnici a Harrachově (Český statistický úřad, 2013). S počtem obyvatel zde roste i hustota silniční sítě, počet automobilů v domácnosti a počet domů určených pro bydlení a s ním i rozmanitost střešních krytin (MVČR, 2013).

3.2 Vstupní data

3.2.1 Letecká data AISA

Letecká data ze **senzoru AISA - Eagle** byla pořízena Ústavem systémové biologie a ekologie Akademie věd ČR (ÚSBE AV ČR) dne 29. 6. 2010 na objednání České informační agentury životního prostředí (CENIA). V průběhu letecké kampaně bylo nasnímáno 9 linií, z nichž byla vybrána 6. linie (**line06_fds_empl_final10.dat**) zobrazující území Čáslavi a okolí (viz Obr. 7). Linie byla nejméně pokryta oblačností a zároveň zabírala největší podíl zastavěného území. Data byla pořizována za podmínek a s parametry uvedenými v Tab. 4.

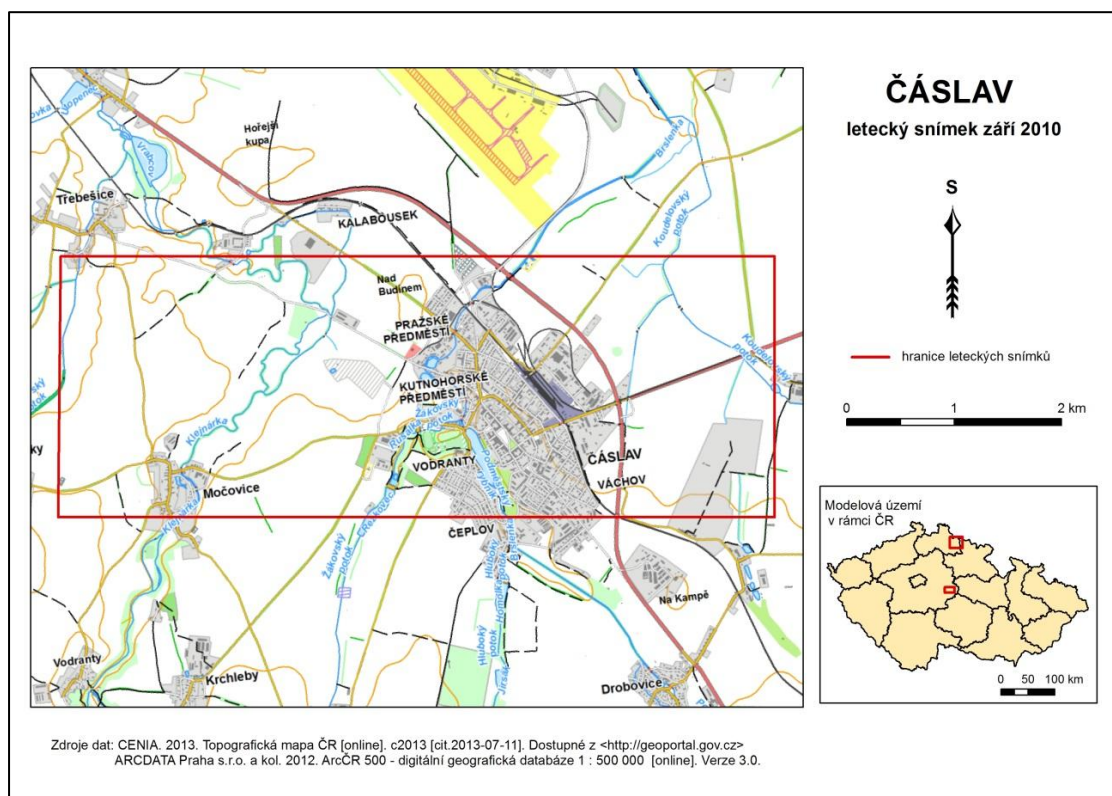
Tab. 4 Parametry senzoru Aisa – Eagle při letecké kampani 29. 6. 2010 (Zdroj: ÚSBE AV ČR, 2010)

Název parametru	Hodnota
Letová rychlost [m/s]	50
Spektrální rozlišení [nm]	10
FPS (frekvence skenování)	10
Prostorové rozlišení [m]	5
Šířka snímané linie [m]	2385
Výška letu nad povrchem [m]	2292
FOV [°]	57,73°
Počet pixelů v příčném směru	477
Počet spektrálních pásem	65

Původní data byla převedena v softwaru CaliGeo ver. 4.6.4 do formátu vhodného pro další analýzy. V tomtéž programu byla provedena ortorektifikace na základě pořízených z GPS/INS jednotky a digitálního modelu terénu. Pro převzorkování byla použita metoda nejbližšího souseda. Data byla georeferencována do souřadnicového systému WGS 84 zóny 33 N.

Atmosférická korekce byla provedena pomocí senzoru FODIS. Pro zpřesnění výsledných dat byla aplikována empirická kalibrace pomocí metody Empirical Line (EL). Vstupní hodnoty pro empirickou kalibraci byly měřeny v průběhu podpůrné pozemní kampaně spektrometrem FieldSpec – 3.

Atmosférické podmínky v době pořízení snímků nebyly zcela ideální. Nízká oblačnost vzduchu byla jasně detekovatelná na mnohých snímcích (ÚSBE AV ČR, 2010).



Obr. 7 Poloha snímku z území Čáslavi a okolí (zdroj: vlastní zpracování)

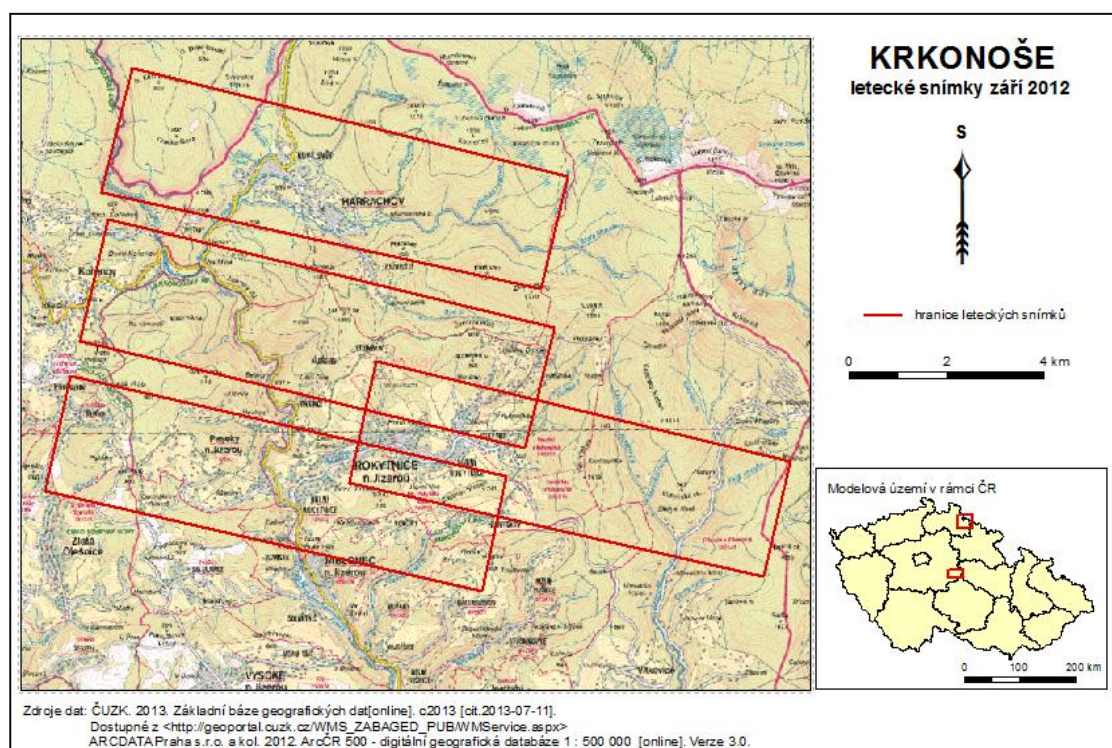
3.2.2 Letecká data APEX

Data pro oblast Krkonoš byla pořízena **senzorem APEX** v rámci projektu HyMountEcos společností VITO dne 10. 9. 2012 od 10 :35 do 14: 13 místního času ve dvou letových výškách, a to 5750 a 6065 m. Bylo nasnímáno celkem 15 linií, z nichž byly vybrány čtyři, které nejlépe zobrazují území Rokytnice nad Jizerou a Harrachova. Vybrané linie jsou v Tab. 5 a na Obr. 8.

Tab. 5 Vybrané linie pro analýzu dat (Zdroj: vlastní zpracování)

Název linie	Město
APEX_HYME1_120910_a05r_Part_0_R	Harrachov
APEX_HYME1_120910_a11r_Part_3_R	Rokytnice nad Jizerou
APEX_HYME1_120910_a11r_Part_4_R	Rokytnice nad Jizerou
APEX_HYME2_120910_a01r_Part_0_R	Rokytnice nad Jizerou

Na původní data byly aplikovány radiometrické korekce. Chyby v prvních dvou spektrálních pásmech, v pěti SWIR pásmech kolem 1020 nm a na konci SWIR regionu byly opraveny na základě nepřímo získaných nadstavbových koeficientů odvozených z metadat poskytnutých uživateli. Následně byl odstraněn „smile efekt“. Dále byly provedeny geometrické korekce na základě dat ze senzoru GPS/IMU a digitálním modelem terénu (DMT) dodaného uživatelem. Data byla georeferencována do souřadnicového systému WGS 84, zóny 33N. Atmosférické korekce byly provedeny pomocí modelu MODTRAN4. Nakonec byly vyhlazeny spektrální křivky za účelem odstranění šumu a ostrých vrcholů vzniklých po atmosférické korekci (VITO, 2013).



Obr. 8 Poloha snímků vybraných pro oblast Krkonoš (zdroj: vlastní zpracování)

Data ze senzoru APEX byla pořizována za podmínek a s parametry uvedenými v Tab. 6.

Tab. 6 Parametry senzoru APEX při letecké kampani HyMountEcos (zdroj: VITO, 2013)

Parametry	VNIR	SWIR
Spektrální rozsah [nm]	380, 5 – 971,7	941, 2 – 2501,5
Vzorkovací interval [nm]	0,55 – 8	5- 10
Spektrální rozlišení (FWHM) [nm]	0,6 – 6,3	6,2 – 11
Počet spektrálních pásem	288	
Počet pixelů v příčném směru	1000	
FOV [°]	28	
IFOV [°]	0,028	
Prostorové rozlišení [m]	2,43 m	
Výška letu nad povrchem [m]	5750 a 6065 m	

3.2.3 Data pozemního měření

Podporu letecké kampaně zajistila terénní měření. Pozemní kampaň probíhala ve třech obdobích. V Krkonoších během září 2012 a května 2013. V Čáslavi začátkem června (viz Tab. 7). K měření byl použit pozemní spektorradiometr FieldSpec4 Wire – Res.

Tab. 7 Data, místa a způsob měření (Zdroj: vlastní zpracování)

Datum	Město	Způsob měření
22. 9. 2012	Rokytnice nad Jizerou	Kontaktní sonda
23. 9. 2012	Rokytnice nad Jizerou	Kontaktní sonda
18. 5. 2013	Rokytnice nad Jizerou	Kontaktní sonda
19. 5. 2013	Rokytnice nad Jizerou	Měření pomocí optického kabelu
25. 5. 2013	Harrachov	Kontaktní sonda
5. 6. 2013	Čáslav	Kontaktní sonda

Podmínky pro pozemní výzkum nebyly zcela ideální. Pomocí optického kabelu (bezkontaktně) lze měřit pouze za jasné oblohy, kdy má atmosféra malý vliv na odrazivost. Při zvýšené oblačnosti je elektromagnetické záření pohlcováno oblaky a atmosféra obsahuje větší množství vodních par, které způsobují šum v regionu vlnových délek okolo 1400 a 1900 nm. Měření pomocí optického kabelu bylo možné pouze 19. 5. 2013.

Oproti tomu kontaktní sondou, kterou se měří data v laboratoři a v terénu lze měřit i v podmínkách zatažené oblohy. Jediným požadavkem je suchý zemský povrch, protože

vlhkost snižuje celkovou odrazivost. Vhodné podmínky pro terénní měření byly dne 23. 9. 2012.

Při měření spektrálních vlastností vzorků spektrometrem byla zároveň zaznamenávána jejich poloha pomocí přístroje GPS. V Příloha 2 jsou znázorněny polohy měření vzorků v Rokytnici nad Jizerou a v Příloha 3 vzorků v Harrachově. Zeměpisné souřadnice jsou pak uvedeny u jednotlivých vzorků ve spektrálním katalogu (viz Příloha 6 Příloha 7).

Asfalt byl v oblasti Krkonoš nejdostupnější antropogenní materiál. Jeho odrazivost se dala měřit jak kontaktní sondou v laboratoři, tak optickým kabelem v terénu. Beton se v oblasti Krkonoš vyskytoval jen v podobě zámkové dlažby, která tvořila velmi malé plochy. Nejnáročnější bylo změřit odrazivost střešních krytin, jelikož nebyly volně přístupné a dostatečně nízko. I přes tyto překážky bylo získáno devět spektrálních měření střešních krytin. Nejčastěji používané střešní krytiny v oblasti Krkonoš jsou různobarevné plechy, eternit a bitumenové šindele.

V Čáslavi jsou komunikace a parkoviště z asfaltu. Betonové plochy jsou rozsáhlejší než v Krkonoších a opět jsou tvořené zámkovou dlažbou. Na druhou stranu použitá data ze senzoru AISA mají o necelé 3 m horší prostorové rozlišení než data ze senzoru APEX. Budovy v Čáslavi jsou podstatně vyšší než v Krkonoších, proto nebyla získána žádná spektra střešních krytin. Téměř všechny místní střechy jsou z červené pálené tašky; tovární haly pak mají plechové střechy. Poloha vzorků měřených v Čáslavi je na mapě v Příloha 4. Souřadnice měření jsou rovněž uvedeny u jednotlivých vzorků ve spektrálním katalogu (viz Příloha 7).

3.3 Metodika

3.3.1 Spektrální knihovna

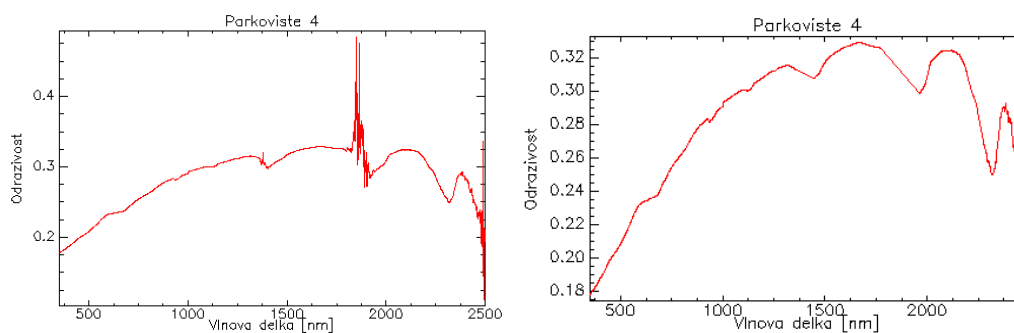
Z dat naměřených v terénu a v laboratoři (laboratorní spektra) byly vytvořeny v programu ENVI 5.0 spektrální knihovny pro tři zájmová území. Spektrální knihovny jsou přiloženy na CD. Jejich názvy jsou uvedeny v Tab. 8.

Spektrum každého materiálu bylo na jednom stanovišti měřeno desetkrát. Každé měření bylo uloženo v nativním formátu spektrometru *.asd, které bylo v programu Viewspec Pro převedeno do formátu textového souboru, s nímž software ENVI 5.0 pracuje. Referenční spektrum pro klasifikaci bylo stanoveno jako průměr z naměřených dat jednoho stanoviště.

Tab. 8 Spektrální knihovny (zdroj: vlastní zpracování)

Zájmové území	Název spektrální knihovny
Rokytnice nad Jizerou	Spektra_Rokytnice_kontaktni
	Spektra_Rokytnice_bezkontaktni
	Spektra_Rokytnice_strechy_snimek
	Spektra_Rokytnice_komunikace_snimek
Harrachov	Spektra_Harrachov_kontaktni
	Spektra_Harrachov_strechy_snimek
	Spektra_Harrachov_komunikace_snimek
	Spektra_Harrachov_komunikace_ppi
	Spektra_Harrachov_strechy_ppi
Čáslav	Spektra_Caslav_kontaktni
	Spektra_Caslav_strechy_snimek
	Spektra_Caslav_komunikace_snimek
	Spektra_Caslav_komunikace_ppi
	Spektra_Caslav_strechy_ppi

Z dat měřených pomocí optického kabelu (terénních spekter) byla odebrána pásma, která odpovídají vlnovým délkám absorpce vodními parami: 1358 – 1445 nm, 1773 – 1962 nm a 2480 – 2500 nm. Spektrální křivka před a po korekci je na Obr. 9.



Obr. 9 Spektrální křivka před korekcí (vlevo) a po korekci (vpravo) (zdroj: vlastní zpracování)

Z terénních spekter a laboratorních spekter byl vytvořen spektrální katalog, který obsahuje druh materiálu, název stanoviště, zeměpisné souřadnice, spektrální křivku, fotografii a základní charakteristiky nejvýznamnějších absorpcí (viz Příloha 5 - Příloha 7). Spektrální katalog Rokytnice nad Jizerou zahrnuje jak spektra měřená pomocí optického kabelu, tak spektra měřená kontaktní sondou (viz Příloha 5). Protože měření pomocí optického kabelu probíhala ve většině případů na stejných stanovištích jako měření kontaktní sondou, byla spektra zařazena do jednoho grafu. Spektrální křivka s vyšší odrazivostí a nižší intenzitou barvy v grafu odpovídá

měření pomocí optického kabelu. Spektrální křivky z území Čáslavi byly převzorkovány do spektrálního rozlišení snímku.

Základní charakteristiky (hloubka, šířka, plocha a asymetrie) nejvýznamnějších absorpcí byly zjišťovány po odstranění kontinua. U spekter z území Čáslavi byla nastavena minimální hloubka absorpce na 1 % a u spekter z území Harrachova a Rokytnice nad Jizerou na 3 %. Při takovéto hodnotě byly vybrány pouze důležité absorpce, které mohou být zásadní pro následnou klasifikaci. Tyto charakteristiky jsou uvedeny u každého spektra ve spektrálním katalogu v Přílohách Příloha 5 - Příloha 7.

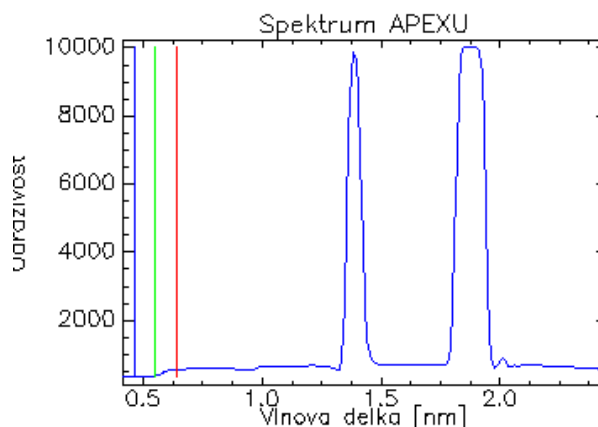
Spektra střešních krytin, která byla použita jako vstupní data pro další analýzy, byla odebrána přímo ze snímku (obrazová spektra). Průměrné spektrum jedné střešní krytiny bylo spočítáno z pěti spekter sebraných z jedné střechy. Typ střešních krytin byl určen během terénního průzkumu, který proběhl od 19. 7. 2013 do 20. 7. 2013.

Pro všechna zájmová území byla také ze snímku odebrána také spektra komunikací (obrazová spektra), z nichž byly vytvořeny další spektrální knihovny uvedené v Tab. 8. Povrch komunikace byl určen na základě terénního průzkumu.

Metoda výpočtu indexu čistoty pixelu (PPI) umožnila výběr čistých pixelů, tj. pixelů, na jejichž území se nachází pouze jeden krajinný prvek. Metoda výpočtu PPI indexu byla nejprve aplikována na snímek pod maskou komunikací, poté na snímek pod maskou budov. Tím, že byla čistota pixelů počítána nejprve pro pixely tvořící komunikace a poté pro budovy, bylo zajištěno oddělení jejich čistých pixelů a zároveň tím byl omezen výběr čistých pixelů pouze na antropogenní materiály. Z vybraných čistých pixelů (spektra PPI) byly vytvořeny spektrální knihovny budov a komunikací pro Harrachov a Čáslav (viz Tab. 8).

3.3.2 Úprava leteckých dat

Z dat pořízených senzorem APEX byla odstraněna spektrální pásma 145 – 161 (1315, 8 – 1469,9 nm) a 191 – 223 (1742 – 2000 nm). Jedná se o vlnové délky s vysokou absorpcí vodních par, jak je vidět na Obr. 10.



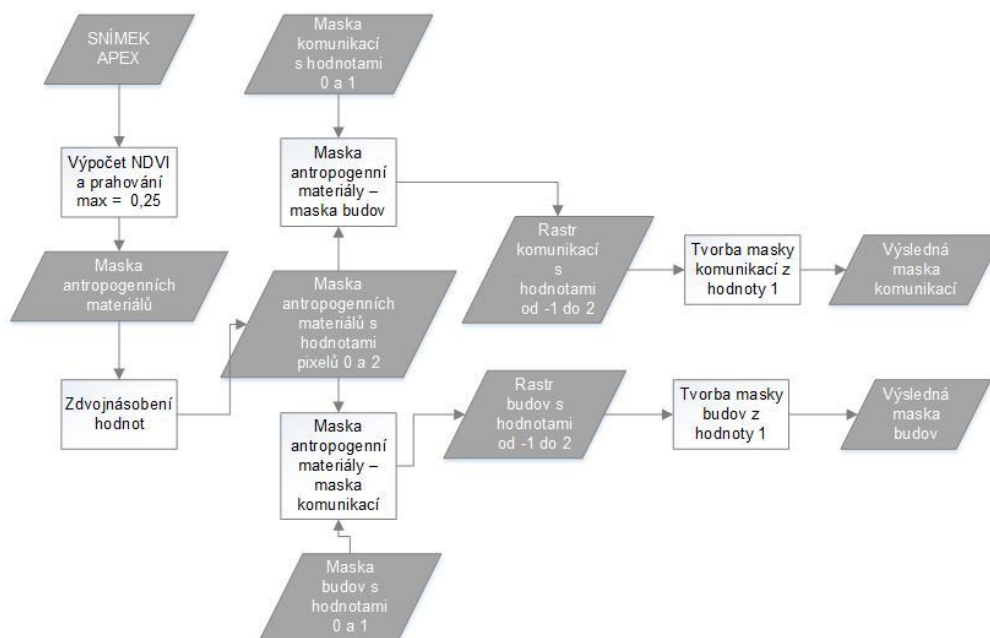
Obr. 10 Spektrum střechy odebrané z neupraveného snímku (zdroj: vlastní zpracování)

Data ze senzoru AISA mají menší spektrální rozsah od 350 nm do 970 nm, který pokrývá pouze VIS a NIR. Data byla použita v celém spektrálním rozsahu.

3.3.3 Tvorba masky komunikací a střech z dat APEX

Ve studii Heldens, et al. (2009) byla použita maska budov a ve studii Mohammadi, Hahn a Engels (2011) maska komunikací, které byly vytvořeny z vektorových polohopisných dat. Podmínkou použití masek z vektorových topografických dat je vysoká polohová přesnost snímků.

V této práci bylo přistoupeno k tvorbě dvou masek: zvlášť pro komunikace a zvlášť pro budovy. Polohopisná data Základní báze geografických dat (ZABAGED) byla poskytnuta Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK). Jelikož polohová přesnost hyperspektrálních snímků ze senzoru APEX je 2 m, byly masky z polohopisných dat dále upraveny (viz Obr. 11).



Obr. 11 Schéma tvorby masky z polohopisných dat ZABAGED (zdroj: vlastní zpracování)

Pro tvorbu masek byly vybrány z dat ZABAGED datové vrstvy: účelový areál, silnice, ulice, ostatní plocha, parkoviště a budovy. Z vrstvy ulic byly odstraněny ulice, které se překrývaly s vrstvou silnic. Od vrstvy účelový areál byla odečtena vrstva budov. Z vrstvy ostatní plocha byly vybrány pouze plochy, které byly tvořeny, betonem asfaltem či štěrkem. Následně byly liniové prvky silnice a ulice převedeny na plošný znak. Šířka silnic byla stanovena na 6 m a ulic na 2 m. Poté byla vytvořena **maska komunikací** z vrstev účelový areál, parkoviště, ostatní plochy, silnice a ulice a **maska budov** z vrstvy budov.

Ze spektrálních pásem 82 (805,5 nm) a 52(681 nm) snímků ze senzoru APEX byl vypočítán normalizovaný vegetační index (NDVI):

Spektrální pásmo 82 odpovídá NIR a spektrální pásmo 52 viditelnému červenému záření (RED). Antropogenní materiály v obraze NDVI nabývaly hodnot od -1 do 0,25. V rozmezí těchto hodnot byla vytvořena jejich maska. Hodnoty pixelů **binární masky antropogenních materiálů** byly zdvojnásobeny, tj. nabývaly hodnot 0 a 2 (viz Obr. 12). Pixelům binárních masek komunikací a budov byly ponechány hodnoty 0 a 1. Obě pak byly jednotlivě odečteny od masky antropogenních materiálů (viz Obr. 12). Výsledné rozdílové rastry tak nabyly hodnot od -1 do 2 (viz Obr. 12). Konečné masky budov a komunikací byly vytvořeny z pixelů s hodnotami 1, jejichž příslušnost spadá do tříd komunikací a budov.

maska antropogenních materiálů		maska komunikací nebo maska budov		výsledný rastrový obraz																																																
<table><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	0	2	2	0	0	2	2	0	0	0	0	0	-	<table><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	=	<table><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	1	0	0	-1	-1	0
0	0	0	0																																																	
0	2	2	0																																																	
0	2	2	0																																																	
0	0	0	0																																																	
0	0	0	0																																																	
0	0	0	0																																																	
0	1	1	0																																																	
0	1	1	0																																																	
0	0	0	0																																																	
0	2	2	0																																																	
0	1	1	0																																																	
0	-1	-1	0																																																	

Obr. 12 Výpočet masky komunikací a budov (zdroj: vlastní zpracování)

3.3.4 Tvorba masky komunikací a střech z dat AISA

Pro snímek ze senzoru AISA byly také vytvořeny dvě masky, a to zvlášť pro komunikace a zvlášť pro budovy. Polohová přesnost tohoto snímku je 20 m, proto nebyla použita polohopisná data ZABAGED pro vytvoření masek, ale byl zvolen alternativní postup znázorněný na Obr. 13.

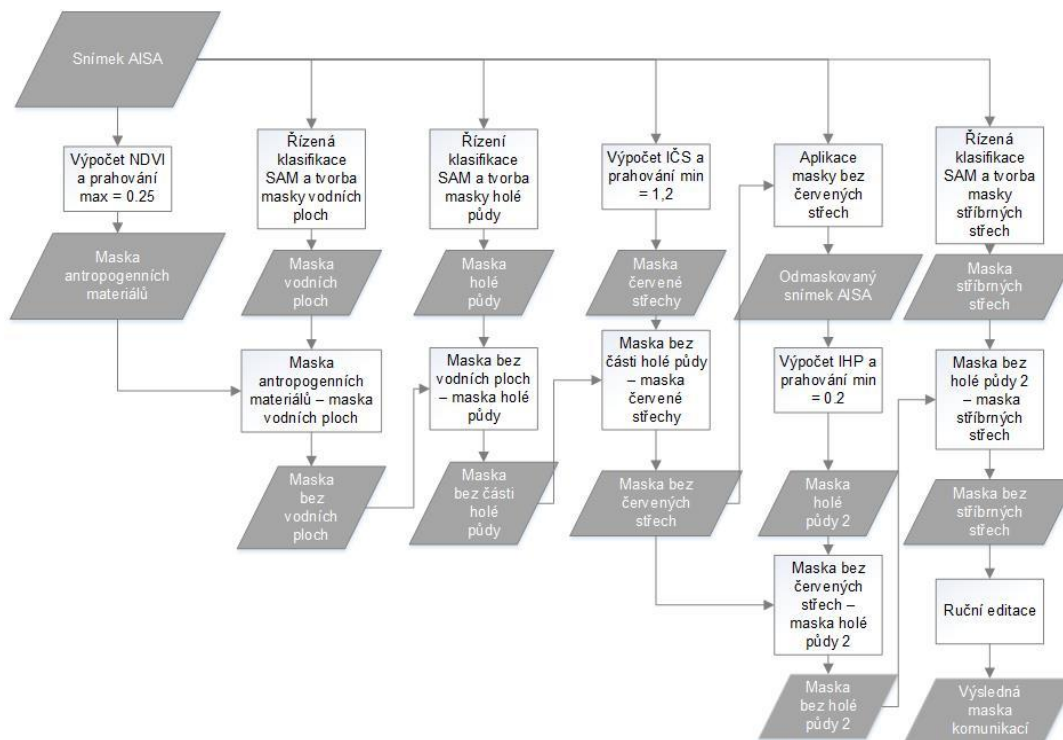
Nejprve byla vytvořena maska komunikací. Ze spektrálních pásem 45 (pásmo NIR: 801,41 nm) a 32 (pásmo VIS: 679,87 nm) byl vypočítán NDVI. Antropogenní materiály v NDVI nabývaly hodnot nižších než 0,25. Selekcí takových hodnot byla vytvořena **maska antropogenních materiálů**. Všechny nově vzniklé masky byly odečítány od masky vzniklé v předcházejícím kroku. Vodní plochy byly odstraněny pomocí klasifikace metodou SAM a vytvořením masky vodních ploch z klasifikovaných pixelů. Maska antropogenních materiálů obsahovala i pixely s holou půdou. Ty byly částečně odděleny řízenou klasifikací metodou SAM, z jejichž výsledků byla vytvořena samotná **maska holé půdy**.

Pro odstranění červených střešních krytin z masky byl vytvořen nový index, který byl nazván „index červené střechy (ICS)“:

Vlnová délka 596,52 nm odpovídá oblasti červeného viditelného záření a vlnová délka 550,51 nm odpovídá oblasti zeleného viditelného záření. Index byl stanoven na základě rozdílů odrazivosti červené střechy v červené části viditelného záření (nejvyšší) a v zelené části viditelného záření (nejnižší). Červená taška má také nejvyšší odrazivost ze všech antropogenních materiálů v červené části viditelného záření. Pixely s hodnotou větší nebo rovnou 1,2 představovaly v obraze červené střechy. Selekcí takových hodnot byla vytvořena maska červených střech.

Výsledná maska byla aplikována na všechna pásma snímku ze senzoru AISA, tj. výstupem byl snímek, kde pixely, které nepředstavovaly antropogenní materiály, měly hodnotu 0. Ze spektrálních křivek obrazu bylo zjištěno, že na vlnové délce 642,83 nm (pásmo 28) má holá půda vyšší odrazivost než antropogenní materiály a na vlnové délce 460, 88 nm (pásmo 8) naopak nižší. Na tomto základě byl vytvořen nový index, který byl nazván jako index holé půdy (IHP) :

Maska holé půdy 2 byla vytvořena z pixelů o minimální hodnotě 0,2. Pomocí řízené klasifikace metodou SAM byla odstraněna vodní plocha s oparem. Společně s ní se oddělily i stříbrné střechy. Vznikla tak **maska stříbrné střechy**. Maska komunikací byla nakonec upravena ruční editací, kdy byly odstraněny zbylé pixely holé půdy a vodních ploch.



Obr. 13 Schéma tvorby masky komunikací nad daty AISA (zdroj: vlastní zpracování)

Maska střech nakonec vznikla součtem masek červené střechy a stříbrné střechy. Ruční editací byla odstraněna vodní plocha s oparem a zbytky holé půdy. Střechy pokryté asfaltovou lepenkou nebylo možné odlišit od povrchu komunikací.

Přesnější masku komunikací a střešních krytin by umožnilo nové a přesnější georeferencování obrazu. Pak by bylo možné použít jako masku polohopisná data ZABAGED nebo data leteckého laserového skenování, jako tomu bylo v Koetz, et al. (2008).

3.3.5 Klasifikační algoritmy

Klasifikace je proces, při kterém se obrazová data rozdělí do tříd podle klasifikačních pravidel. Jelikož v této práci bude využita pouze řízená pixelová klasifikace, bude jí věnován širší prostor. Řízená klasifikace je postavena na principu výběru trénovacích ploch, které reprezentují jednotlivé třídy. Po výběru trénovacích ploch následuje klasifikační stádium, což je automatická práce počítače za využití klasifikačních algoritmů (Dobrovolný, 1998).

Mezi metody vhodné pro klasifikaci antropogenních materiálů patří například Spectral Angle Mapper (SAM), Spectral Information Divergence (SID), Linear Spectral Unmixing (LSU) a Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA). Všechny uvedené klasifikační algoritmy byly použity v této práci.

SAM pracuje s odrazivostí každého pixelu. Odrazivost si lze představit jako n – dimenzionální vektor, kde n představuje počet spektrálních pásem. Jas je udán délkou vektoru a spektrální charakteristika je udána směrem vektoru. Klasifikátor porovnává spektrální úhel

mezi spektrem daného pixelu a spektrem, které je získáno v trénovacím souboru nebo ze spektrální knihovny. Pixel je přiřazen ke třídě, kde je tento úhel nejmenší (Park, et al., 2007).

Klasifikátor **SID** poskytuje podobné výsledky, jako SAM. Ve výsledné klasifikaci metodou SAM je však více šumu. Metoda SID je založena na výpočtu divergence spektra klasifikovaného pixelu a referenčního spektra. Menší rozdíl mezi spektry zvyšuje pravděpodobnost, že jsou si pixely podobné. Ty pixely, které nesplňují stanovenou prahovou hodnotu, nejsou klasifikovány (ENVI Tutorial, 2009).

Další algoritmus pracující s vlastnostmi spekter, je **LSU** založený na předpokladu, že na ploše jednoho pixelu je zachyceno více druhů povrchu. Výsledná hodnota odrazivosti je určena odrazivostí jednotlivých složek a výsledné spektrum je tak vážený průměr jednotlivých materiálů. Výstupem klasifikace tak je několik obrazů představujících pravděpodobnost výskytu třídy na ploše pixelů. Každý obraz by měl nabývat hodnot od 0 do 1, kde např. hodnota 0,75 v obraze pro třídu 1 představuje 75% pravděpodobnost výskytu této třídy (ENVI Tutorial, 2009).

Metoda **MESMA** je založena na míšení spekter čistých materiálů, tj. tvořených jedním typem materiálu. Příkladem tak může být použití spektra stromu a střešní krytiny. V rámci metody MESMA je možné pracovat s dvoučlennými, tříčlennými a čtyřčlennými modely. Ve dvoučlenném modelu jsou míšena pouze spektra z jedné spektrální knihovny se stínem. Stín je možné nechat spočítat klasifikátorem anebo algoritmu dodat čisté spektrum stínu. Ve tříčlenném modelu jsou míchána spektra dvou spektrálních knihoven a stínu. Do spektrálních knihoven by měla být umístěna spektra, u kterých je předpoklad, že se budou vyskytovat v jednom pixelu. V metodě lze zvolit mnohem více omezujících parametrů: minimum a maximum frakce spekter ze spektrální knihovny, maximum frakce stínu, maximum RMSE spekter ze spektrální knihovny či reziduální omezení (Robert et al., 2007). Jak uvádí Franke, et al. (2009), pro klasifikaci antropogenních materiálů je dostačující dvoučlenný model.

3.3.6 Klasifikace snímků

Snímky pořízené senzorem APEX byly převedeny z datového typu floating point na integer. Jelikož se tímto procesem hodnoty odrazivosti ve snímku posunuly z rozmezí 0 – 1 do rozmezí 0 – 10 000, byly na takové hodnoty odrazivosti převedeny i spektrální knihovny. Původní snímek a spektrální knihovny byly použity pro klasifikaci metodou MESMA, jelikož ta neumí pracovat s datovým typem integer. Spektrální knihovny používané pro klasifikaci metodou MESMA byly „převzorkovány“ do spektrálního rozlišení snímku, neboť tato klasifikační metoda vyžaduje shodný počet spektrálních pásem jak u knihovny, tak u klasifikovaného snímku. Ze snímků, které zobrazují územím Rokytnice nad Jizerou, byla vytvořena mozaika založená na spojení snímků prostřednictvím zeměpisných souřadnic. Výstupem mozaikování je tak jeden celistvý obraz zájmového území. Snímek pořízený senzorem AISA nebyl nijak měněn.

Klasifikace snímků byla uskutečněna pomocí čtyř metod uvedených v předcházející kapitole 3.3.5 za využití 14 spektrálních knihoven, které jsou v Tab. 8. Všechny snímky, které vstupovaly do klasifikačních procesů, byly pod maskou komunikací nebo budov. Klasifikace budov a komunikací tak probíhala odděleně. Výstupem bylo 56 klasifikací.

Klasifikace komunikací

Metoda SAM umožňuje nastavit omezující podmínku maximálního úhlu pro každou referenční spektrální křivku. Maximální povolený úhel určuje odchylku od referenčního spektra. Stanovuje tak, jak moc mohou být materiály rozmanité. Hlavním stavebním materiálem silnic a ulic v zájmových územích je asfalt. V daleko menší míře se vyskytují typy povrchu: beton, dlažební kostky a štěrk. Nastavení maximálního povolení úhlu pro jednotlivé typy materiálu bylo odvozeno z počtu měření při pozemní kampani v Čáslavi. Pro ostatní lokality byla tato hodnota převzata. Pro asfalt byla ponechána defaultní hodnota 0,1 a pro ostatní materiály komunikací (beton, štěrk a dlažební kostka) byla vypočítána podle následujícího vztahu:

kde 0,1 je maximální povolený úhel pro asfaltové povrchy, 4 je počet měření betonu a dlažební kostky a 7 je počet měření asfaltu.

Tento postup mohl být použit, jelikož beton, dlažební kostka a štěrk se ve všech zájmových územích vyskytují minimálně a ani se nijak výrazně neliší jejich spektrální charakteristiky v rámci jednoho typu povrchu.

Počet měření jednotlivých typů pokryvu komunikací v Čáslavi sloužil také ke stanovení omezující podmínky divergence pro **klasifikační algoritmus SID**. Pro spektrální křivky asfaltu byla ponechána defaultní hodnota 0,05 a pro ostatní povrchy byla vypočítána na základě vztahu:

kde 0,05 je maximální povolená divergence spekter asfaltu, 4 je počet měření betonu a dlažební kostky a 7 počet měření asfaltu.

Výstupem **metody LSU** bylo několik obrazů představujících pravděpodobnost výskytu tříd na ploše pixelu. Problematickým místem této klasifikace bylo, že hodnoty obrazů přesahovaly interval , což poukazovalo na nevhodný výběr koncových členů (referenčních spekter) klasifikace. Každý z obrazů byl vizualizován metodou prahování (density slice), která umožňuje znázornit hodnoty obrazu v několika intervalech. Pro potřeby vizualizace klasifikací z metody LSU byla pro všechny třídy stanovena následující rozmezí:

, což pomohlo ke stanovení prahových hodnot jednotlivých tříd na 0,5 a 2. Rozmezí bylo stanoveno empiricky z obrazu

upraveného metodou prahování a za využití znalosti pokryvů komunikací některých míst v klasifikaci. Toto rozmezí posloužilo k vytvoření binárních masek všech tříd. Každá z masek byla vynásobena jedním číslem z množiny Z^+ . Vynásobené masky byly následně sečteny, což je definováno následujícím vztahem:

Tento postup umožnil rozpoznat i překryvy dvou a více tříd. Příkladem jsou třídy s hodnotami pixelů 1 a 2, kde třída jejich překryvu je reprezentována hodnotou 3, což je jejich součet. Jednotlivé třídy překryvů byly následně přiřazeny k jedné z referenčních tříd z Tab. 9.

Klasifikátor MESMA byl použit v podobě dvoučlenného modelu a s veškerými omezujícími podmínkami v defaultním nastavení:

- minimum frakce spekter ze spektrální knihovny : - 0,05
- maximum frakce spekter ze spektrální knihovny: 1, 05
- maximum frakce stínu: 0,8
- maximum RMSE spekter ze spektrální knihovny: 0, 025
- reziduální omezení výsledků klasifikace: 0, 025 pro 7 po sobě následujících pásem.

Klasifikace střešních krytin

Pro klasifikaci střešních krytin byly použity přednastavené hodnoty klasifikačních algoritmů. Omezující podmínky pro metody SAM a SID nebyly nijak měněny, protože během terénního průzkumu nebylo možné zjistit, která ze střech je na území Rokytnice nad Jizerou a Harrachova převažující. Pro klasifikaci území Čáslavi se podařilo zjistit, že převládající střešní krytinou je červená taška. Avšak ani u ní omezující podmínka nebyla měněna, jelikož v klasifikovaném obraze nebyla ve velké míře zaměňována s ostatními třídami. Pro metodu SAM tak byla ponechána přednastavená hodnota maximálního povoleného úhlu (0,1) a pro metodu SID maximální povolené divergence (0,05).

Jediným rozdílem u metody LSU byl mnohem vyšší počet klasifikovaných materiálů, čímž docházelo k mnohonásobným překryvům tříd. Tvorba výsledné klasifikace tak byla náročnější. Metoda MESMA byla použita ve stejné podobě jako u komunikací.

Reklasifikace

Klasifikované obrazy vytvořené v softwaru ENVI neměly jednotné označení tříd, proto byly všechny reklasifikovány, neboť bez jednotného označení tříd není možné provést následné hodnocení přesnosti klasifikace. Samotná reklasifikace byla provedena v programu ArcGIS, pro

něžž byly převedeny všechny klasifikované obrazy do formátu geotiff. U metody MESMA bylo ještě nutné transformovat klasifikovaný obraz z datového typu float integer na integer, v němž byly uloženy i ostatní klasifikace. Následně bylo možné provést reklasifikaci obrazu na třídy uvedené v Tab. 9.

Tab. 9 Klasifikační legenda (zdroj: vlastní zpracování)

Čáslav			
komunikace		střechy	
třída klasifikace	název	třída klasifikace	název
1	asfalt	1	taška
2	beton	2	červený šindel
3	dlažební kostka	3	červený plech
		4	stříbrný plech
		5	zelený plech

Harrachov				Rokytnice nad Jizerou			
komunikace		střechy		komunikace		střechy	
třída	název	třída	název	třída	název	třída	název
1	asfalt	1	taška	1	asfalt	1	taška
2	asfalt s příměsí křemene	2	červený plech	2	asfalt s příměsí křemene	2	červený plech
3	beton	3	červený šindel	3	beton	3	červený eternit
5	antuka	4	stříbrný plech	4	šterk	4	stříbrný plech
6	umělá tráva	5	hnědý plech			5	hnědý plech
		6	zelený plech			6	zelený plech
		8	černý šindel			7	asfaltová lepenka (IPA)
						8	černý šindel
						9	černý plech

Pro lepší vizuální vjem byl na klasifikace aplikován mediánový filtr s konvolučním oknem 3×3 , který byl použit pouze pro tvorbu mapových výstupů.

3.3.7 Hodnocení přesnosti

Klasifikaci snímku je možné považovat za dokončenou až po verifikaci její přesnosti. K hodnocení přesnosti se využívají způsoby, které však přesnost klasifikace spíše odhadují (Lillesand et al., 2008).

Jednou z takových metod je **klasifikační chybová matice**, která je postavena na principu porovnávání tříd klasifikovaných a skutečných v bodech, u nichž je skutečná třída známá.

Obsahuje tak tolik řádků a sloupců kolik je tříd klasifikace. Data, které jsou klasifikována správně, se vyskytují na hlavní diagonále. Všechny ostatní hodnoty, které se objevují mimo hlavní diagonálu, jsou chyby. Počet kontrolních bodů by měl být minimálně 50 pro každou třídu, ale je možné je přizpůsobit podle důležitosti a četnosti výskytu tříd v klasifikovaném území (Lillesand, et al., 2008).

Z klasifikační chybové matice vychází další ukazatelé přesnosti – uživatelská přesnost, zpracovatelská přesnost a celková přesnost. Uživatelská přesnost se počítá jako podíl správně klasifikovaných pixelů a počtu pixelů, které byly do této třídy zařazeny. Zpracovatelská přesnost se spočítá jako poměr správně klasifikovaných pixelů a pixelů použitých pro testování dané třídy. Celková přesnost se vypočítá jako podíl všech správně klasifikovaných pixelů a celkového počtu klasifikovaných pixelů (Lillesand et al., 2008).

V této práci byly použity dvě metody hodnocení přesnosti. Jednou z nich byla celková přesnost vypočtená z klasifikační chybové matice. Druhou použitou metodou byl podíl klasifikovaných pixelů pokryvů komunikací a střešních krytin. Obě metody zjišťovaly přesnost klasifikací zvlášť pro pokryvy komunikací a typy střešních krytin u všech klasifikací.

Pro první metodu - **celkovou přesnost** byly získány kontrolní body během terénního průzkumu a z Google Street View. Ten byl použit, protože nebylo k dispozici dostatečné množství kontrolních bodů z terénního průzkumu. V průběhu terénního průzkumu byl zjišťován pokryv komunikací a typ střešních krytin, které byly zakreslovány do mapy. Stejně tak byl zjišťován pokryv komunikací a typ střešních krytin z Google Street View.

Vektorová vrstva kontrolních bodů pro každé území a zvlášť pro povrch komunikací a typ střešních krytin byla vytvořena nad samotným snímkem v softwaru ArcGIS. Celkem bylo získáno 100 kontrolních bodů pro komunikace a 100 kontrolních bodů pro budovy na každém území. K tvorbě byly použity body se známým typem povrchu z terénního průzkumu a z Google Street View.

Následně byla k vektorové vrstvě kontrolních bodů nahrána informace o klasifikované třídě z pixelů nacházejících se pod kontrolními body, k čemuž byl využit nástroj Extract Multi Values to Point. Klasifikované třídy se tak uložily do atributových tabulek vektorových vrstev kontrolních bodů. Atributové tabulky byly použity pro vytvoření klasifikačních chybových matic v softwaru SPSS Inc, z nichž byla v softwaru MS Excel vypočítána celková přesnost pro všechny klasifikace. Z výpočtu celkové přesnosti byly vyloučeny neklasifikované pixely, tj. od celkového počtu kontrolních bodů byl odečten počet kontrolních bodů, které spadly do třídy neklasifikováno (hodnota 0). Jedná se o takové kontrolní body, pod kterými nebyly pixely v klasifikacích klasifikovány. Ostatní ukazatele (zpracovatelská a uživatelská) přesnost nebyly v práci použity, jelikož by je nebylo možné porovnat s téměř žádnou studií zkoumanou v kap. 2.5.4. U většiny těchto studií totiž byla uvedena pouze celková přesnost.

Druhou použitou metodou v této práci byl výpočet **podílu klasifikovaných pixelů** pokryvů komunikací a střešních krytin. K tomuto hodnocení byly použity masky komunikací a masky střešních krytin, které byly vytvořeny na základě postupů uvedených v kapitolách 3.3.3a a 3.3.4.

Podíl klasifikovaných pixelů tak udává poměr počtu klasifikovaných pixelů (ze všech tříd klasifikace) a celkový počet pixelů tvořících masku komunikací či střešních krytin.

V klasifikacích metodami SAM a SID tvořily samostatnou třídu neklasifikované pixely a pixely, které byly v průběhu klasifikace pod maskou, což je ta samá maska, jako vstupuje do hodnocení přesnosti. Podíl klasifikovaných pixelů u těchto klasifikací byl zjištěn následujícím výpočtem:

Pro klasifikace metodami LSU a MESMA bylo nutné podíl klasifikovaných pixelů zjistit jiným způsobem, protože v klasifikacích nebyly odděleny třídy neklasifikované pixely a pixely, které byly v průběhu klasifikace pod maskou. Masky komunikací a střešních krytin byly vynásobeny 100, čímž vznikly masky s hodnotami 0 a 100. Od nich byly odečteny klasifikace metodami LSU a MESMA. Ve výsledném rastrovém obraze měly hodnotu 0 pixely, které byly v průběhu klasifikace pod maskou a hodnotu 100 neklasifikované pixely. Ostatní hodnoty v rastru představovaly klasifikované pixely. Podíl klasifikovaných pixelů pak byl vypočítán podle stejného vzorce jako u metod SAM a SID.

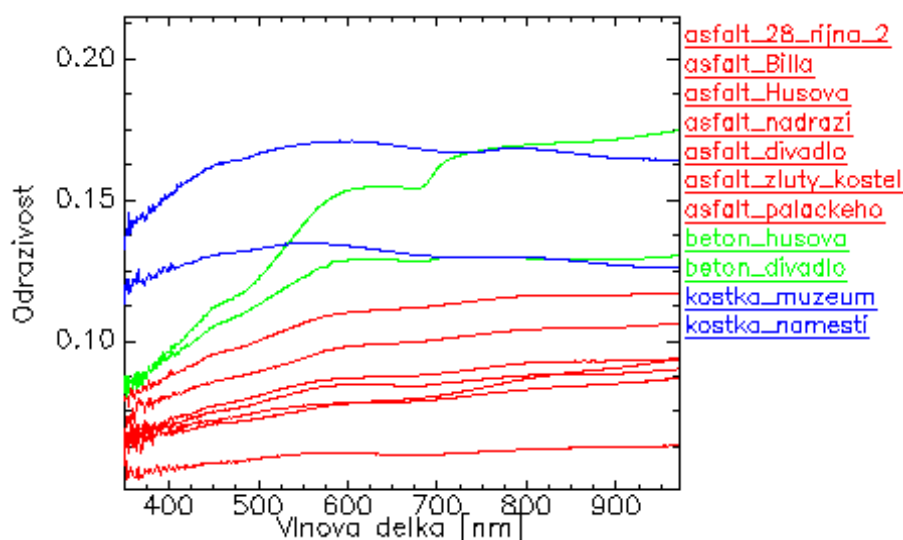
4 VÝSLEDKY

Kapitola se nejprve věnuje popisu spektrálních charakteristik materiálů povrchu komunikací a střešních krytin, které byly porovnávány se spektrálními charakteristikami uvedenými v kap. 2.4. Dalším výsledkem jsou mapy klasifikací, které jsou v Příloha 8 Příloha 19. U všech klasifikací byla zhodnocena jejich přesnost za využití podílu klasifikovaných pixelů a celkové přesnosti klasifikace.

4.1 Spektrální knihovna Čáslav

Spektrální knihovna povrchů komunikací

Spektrální knihovna povrchů komunikací pro Čáslav sestavená na základě dat získaných v terénu měřením kontaktní sondou (laboratorní spektra) obsahuje 2 spektra pro dlažební kostky, 2 spektra betonu a 7 spekter asfaltu (viz Obr. 14).

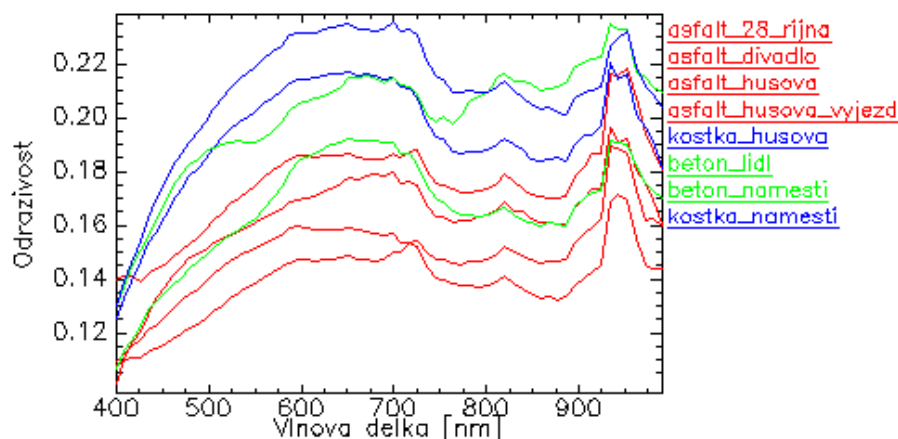


Obr. 14 Spektrální křivka povrchů komunikací z laboratorních spekter (zdroj: vlastní zpracování)

Laboratorní spektra převzorkovaná do spektrálního rozlišení senzoru AISA jsou spektrálně hladká, stále rostoucí, bez výraznějších spektrálních příznaků. Odraživost asfaltu je nižší než u ostatních antropogenních materiálů, které tvoří povrch komunikací. Spektrální křivka betonu roste rychleji než spektrální křivka asfaltu. Spektrální křivky betonu mají ve VNIR dva výraznější spektrální příznaky, a to na vlnových délkách 679 a 879 nm a třetí, méně výrazný, na 480 nm. Tento příznak, by měl odpovídat degradaci betonu, jak je uvedeno výše v kap. 2. 4. 1. Spektrální křivka pro dlažební kostky má celkově nejvyšší odraživost a od 550 nm klesá. Podrobný popis jednotlivých spekter je v Příloha 4.

Dále byla ze snímku odebrána 4 spektra asfaltu, 2 spektra betonu a 2 spektra pro dlažební kostky (viz Obr. 15). Spektrální křivky ze snímku (obrazová spektra) se výrazně liší od laboratorních spekter, což je způsobeno nedokonalou atmosférickou korekcí snímku. Jak

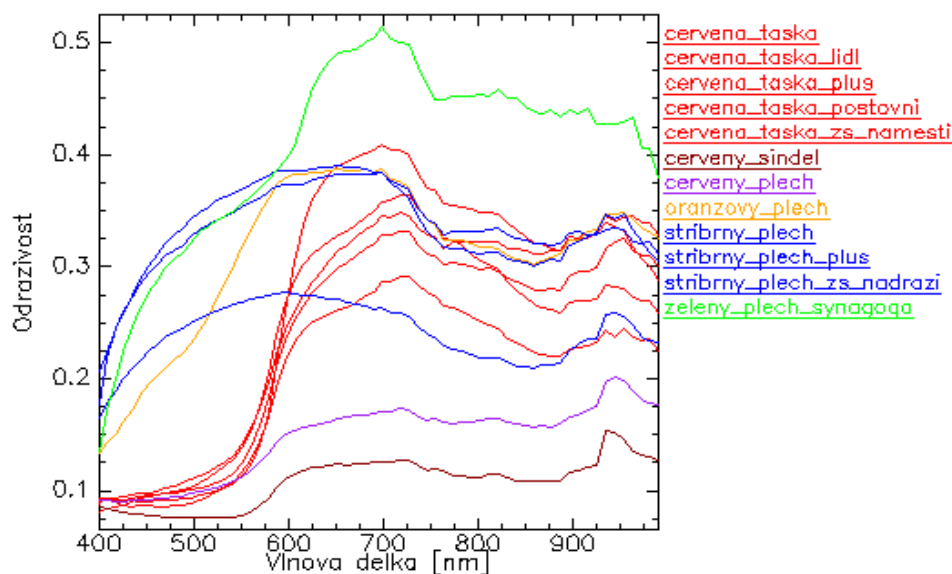
u spekter povrchu komunikací, tak u spekter střešních krytin (viz Obr. 16) je vidět konvexní tvar křivky mezi 700 a 900 nm a konkávní tvar křivky mezi 900 nm a 970 nm. Tento jev se u laboratorních spekter nevyskytuje. Asfalt má opět nejnižší hodnoty odrazivosti. Beton má kolem 550 nm spektrální příznak a dlažební kostky mají nejvyšší odrazivost.



Obr. 15 Spektrální křivky povrchu komunikací ze snímku v Čáslavi (zdroj: vlastní zpracování)

Spektrální knihovna střešních materiálů

Ze snímku bylo odebráno 12 spekter střešních krytin (viz Obr. 16). V terénu bylo zjištěno 6 typů střešních materiálů: červená taška, červený šindel, červený plech, oranžový plech, stříbrný plech a zelený plech. Odrazivost jednotlivých typů střech se liší zejména podle barvy daného povrchu. Odrazivost červené tašky, červeného šindele a červeného plechu roste na vlnové délce 625 nm, která představuje červenou část viditelného spektra. Jejich spektrální křivky se odlišují v celkové odrazivosti. Červený šindel má nejnižší odrazivost, jelikož je z bitumenu posypaného minerály obarvenými na červeně. O něco vyšší odrazivost má červený plech. Nejvyšší odrazivost mají červené tašky. Mají výrazně vyšší odrazivost mezi vlnovými délkami 625 – 740 nm. Oranžový plech má maximum odrazivosti na 565 nm. Maximum zelené části viditelného spektra je na vlnové délce 520 nm, čemuž odpovídá spektrální příznak zeleného plechu. Na odrazivost stříbrného plechu nemá vliv pigmentace, proto ve viditelné části spektra nejsou žádné spektrální příznaky a je kontinuálně rostoucí až do 700 nm.

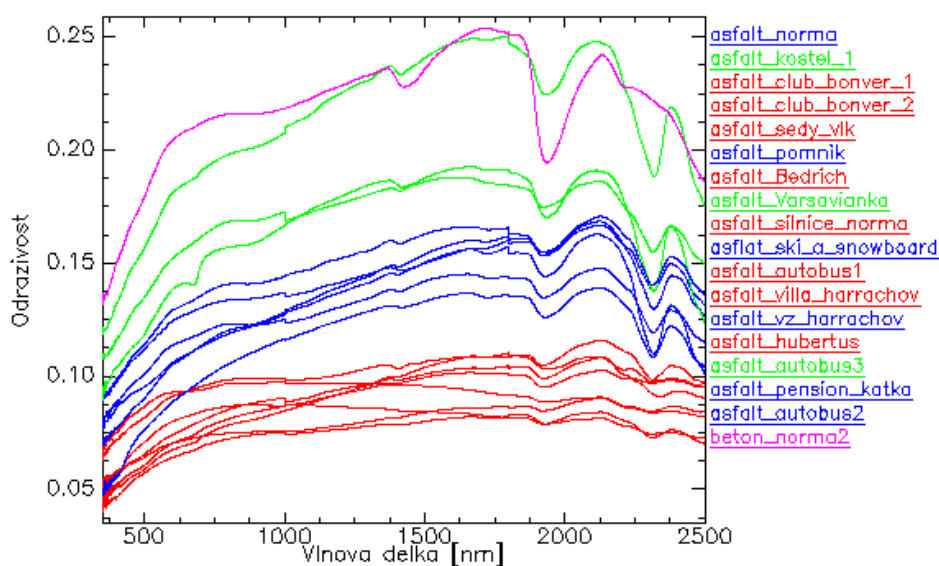


Obr. 16 Spektrální křivky střešních krytin (zdroj: vlastní zpracování)

4.2 Spektrální knihovna Harrachov

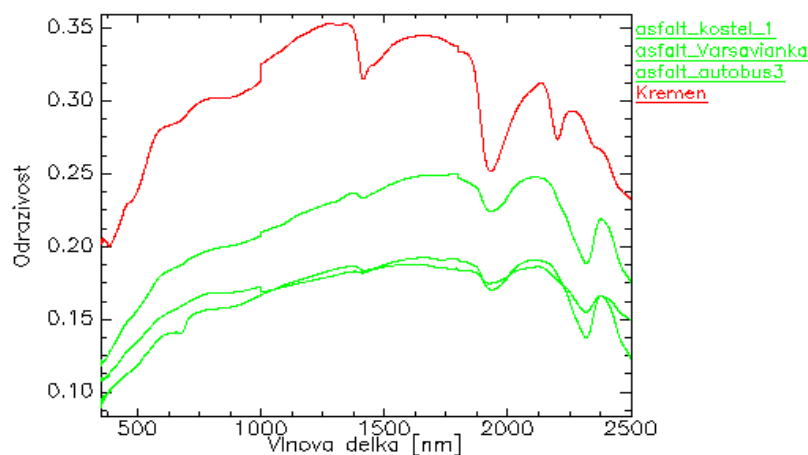
Spektrální knihovna povrchů komunikací

Na území Harrachova bylo naměřeno kontaktní sondou 18 spekter materiálů komunikací, z toho 17 spekter asfaltu a 1 spektrum betonu. Spektrální odrazivost asfaltu je velmi nízká (viz Obr. 17). Odrazivost roste do větších vlnových délek téměř lineárně ve shodě s Heroldem (2004). Jak uvádí Nasarudin, Shafri (2011), v oblasti SWIR kolem 1900 nm a 2300 nm je zřejmá absorpce. Nejnovější asfalt má méně výraznou absorpci na vlnové délce 2300 nm (červené spektrální křivky). Tuto skutečnost potvrzují i spektrální křivky uvedené v Příloha 6. U staršího asfaltu dochází k výraznějšímu nárůstu odrazivosti na vlnové délce kolem 850 nm (modré spektrální křivky), což je pozorovatelné na Obr. 17.



Obr. 17 Spektrální křivky povrchu komunikací v Harrachově (zdroj: vlastní zpracování)

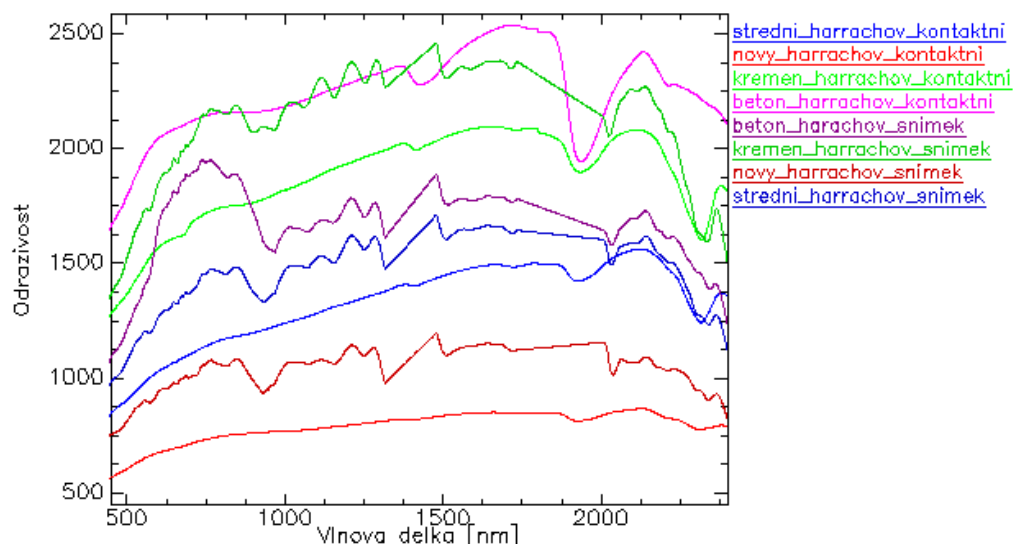
Zelené křivky představují asfalt s 60% zastoupením křemene, který se projevuje zvýšením odrazivosti asfaltu a výraznější absorpcí na vlnové délce kolem 1900 nm. Dále se ve spektrální křivce objevuje absorpce kolem 2300 nm typická pro asfaltové povrchy. Méně výrazné absorpce kolem 1400 nm a 2200 nm jsou způsobeny přítomností křemene. Spektrální křivka křemene a asfaltů s příměsí křemene je na Obr. 18.



Obr. 18 *Spektrální křivka asfaltu s křemenem a křemen (zdroj: vlastní zpracování)*

Betonový povrch reprezentuje zámková dlažba. Odrazivost betonu (růžová spektrální křivka) je celkově vyšší než odrazivost asfaltu. Na vlnové délce 2300 nm by se měl vyskytovat hlavní absorpční pás (Rasher, Jürgens, 2010). Ve skutečnosti se ve spektrální křivce objevuje hlavní absorpční pás kolem 1900 nm, což by podle Arita, et. al. (2011) mělo odpovídat degradaci betonu.

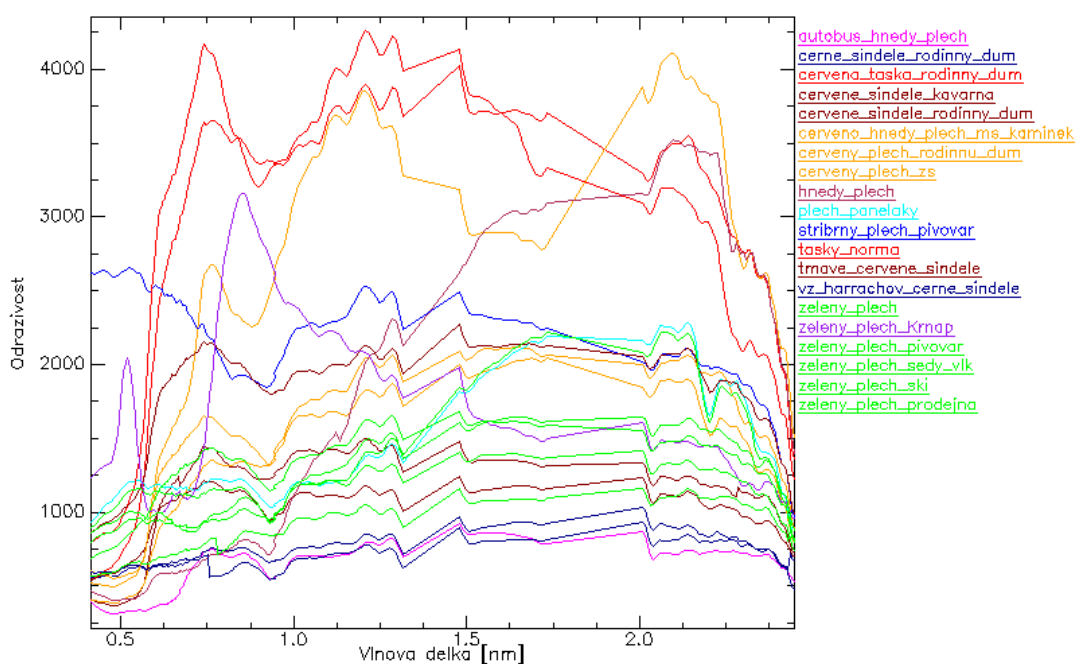
Další spektrální knihovna komunikací byla vytvořena z obrazových spekter. Bylo odebráno 12 spekter asfaltu a jedno spektrum betonu. Spektra asfaltu byla zařazena do tří kategorií, kde pro každou kategorii bylo spočítáno průměrné spektrum. Spektrální křivky byly zaneseny do grafu společně s laboratorními spektry, jak je vidět na Obr. 19. U obrazových spekter je znatelný vliv atmosféry, ačkoliv byly upraveny atmosférickou korekcí.



Obr. 19 Spektrální křivky z kontaktní sondy a ze snímku na území Harrachova (zdroj: vlastní zpracování)

Spektrální knihovna střešních materiálů

Spektra střešních krytin byla odebrána ze snímku. V terénu bylo zjištěno 9 typů střeš: hnědý plech, černý šindel, červená taška, červený šindel, červený plech, plech na panelových domech, stříbrný plech a zelený plech. Všechna získaná spektra plechových střeš kromě zeleného plechu sídla správy KRNAP a stříbrného plechu pivovaru představují hliníkový plech. Hliník je specifický absorpcí na vlnové délce kolem 840 nm (Herold, 2004). Pozinkované plechy jsou typické absorpcí na vlnové délce 1020 nm (Herold, 2004), čemuž odpovídá spektrum zeleného plechu sídla správy KRNAP a stříbrného plechu pivovaru (viz Obr. 20).



Obr. 20 Střešní krytiny Harrachov (zdroj: vlastní zpracování)

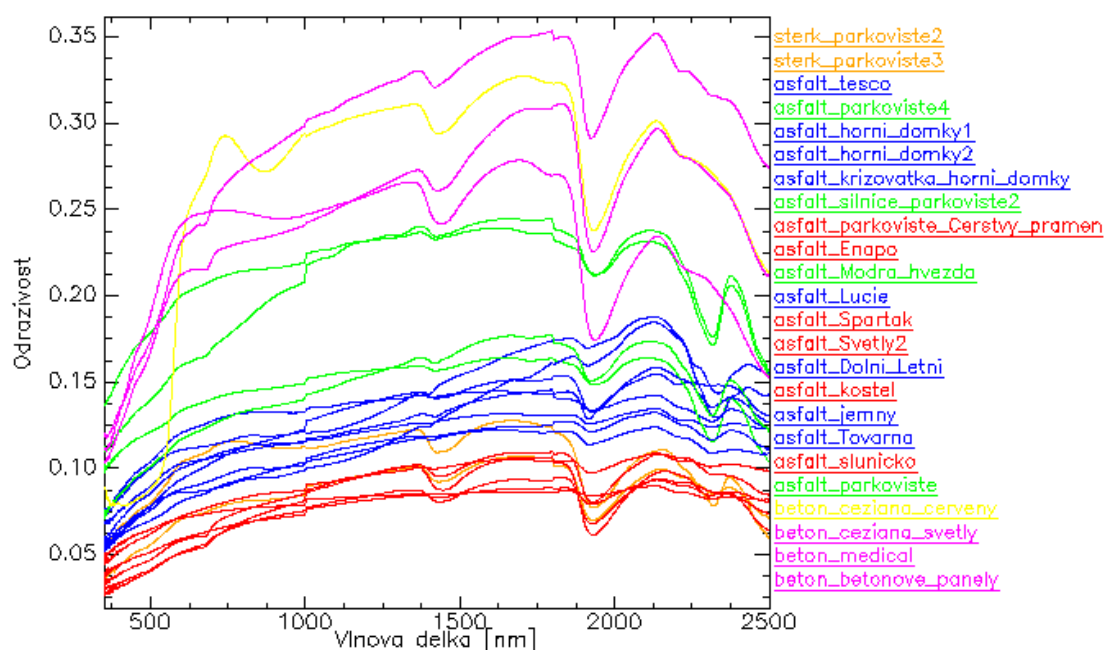
Šindele jsou tvořeny bitumenem. Bitumenové šindele jsou pokryty minerálním posypem, který dodává střešním krytinám barvu. Spektrální křivky bitumenu jsou téměř konstantní. Nevýrazné absorpce se objevují kolem vlnových délek 2000 nm a 1300 nm. Absorpce kolem těchto vlnových délek potvrzuje i Herold, et al. (2004). Černé a červené šindele se liší odrazivostí v červené části viditelného spektra s maximem na vlnové délce 740 nm.

Červené tašky mohou být betonové či pálené. Oba materiály vykazují absorpce kolem vlnových délek 450 a 880 nm, což způsobují oxidy železa (Heiden, et al., 2007). Betonová taška má výraznější lokální maximum na vlnové délce kolem 860 nm. Ze spektrálních křivek není možné usoudit, zda se jedná o betonové či pálené střešní krytiny.

4.3 Spektrální knihovna Rokytnice nad Jizerou

Spektrální knihovna Rokytnice nad Jizerou

Na území Rokytnice nad Jizerou vznikly dvě spektrální knihovny materiálů komunikací. Jedna byla vytvořena z laboratorních spekter (viz Obr. 21) a druhá na základě měření optickým kabelem (terénní spektra).



Obr. 21 Spektrální křivky komunikací v Rokytnici nad Jizerou měřené kontaktní sondou (zdroj: vlastní zpracování)

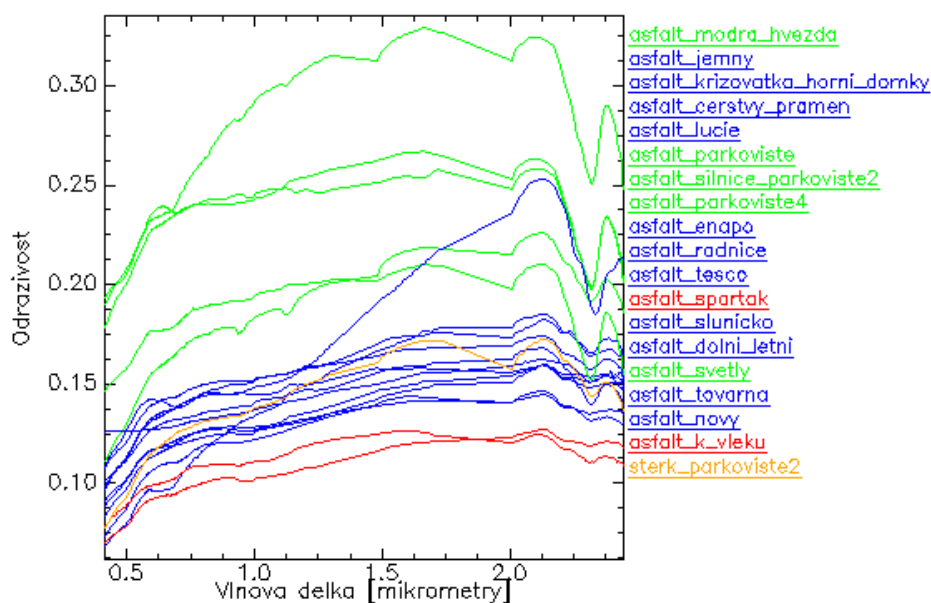
Spektrální příznaky asfaltu jsou popsány v kapitole 4.2 Spektrální knihovna Harrachov. Podrobná charakteristika jednotlivých spekter je ve Spektrálním katalogu (viz Příloha 5). Asfalt nesoucí název „Světly 2“ byl podle spektrální křivky zařazen do kategorie nejnovější asfalt (na obrázku 21 červenou barvou) ačkoliv při terénním průzkumu byl umístěn do kategorie křemen. Tento asfalt je specifický tím, že je tvořen novým asfaltem a křemenem menší

velikosti. Tudiž podíl křemene je kolem 35% nikoliv 60 % jako u ostatních v dané kategorii. Odrazivost u něj také značně snižuje nový asfalt.

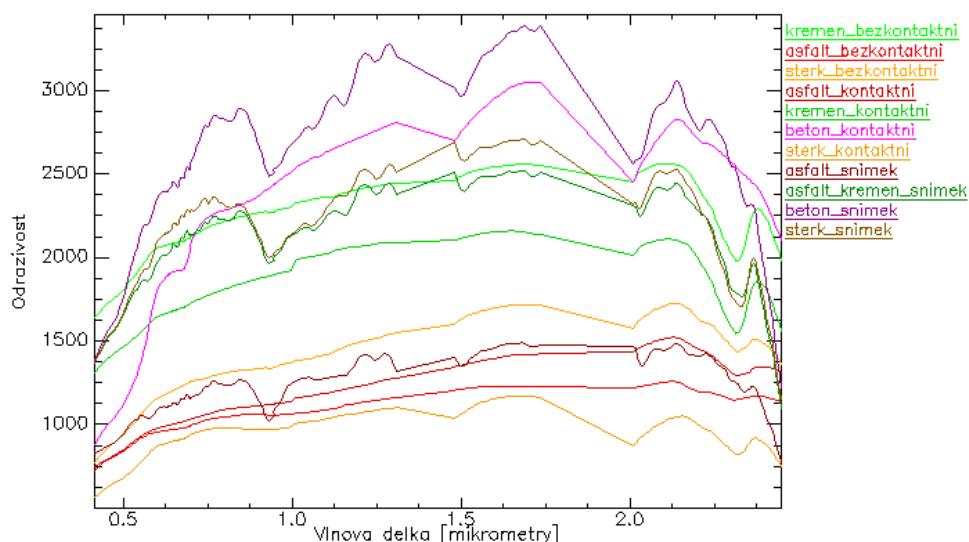
Spektrální příznaky betonu jsou opět popsány v předcházející kapitole 4.2. Beton označený jako „Ceziana červený“ je specifický červenou barvou, proto jeho spektrální křivka má lokální maximum odrazivosti na vlnové délce kolem 740 nm.

Absorpční pásy šterku jsou vázané na minerál, ze kterého je tvořen. Spektrální křivka šterku má absorpci kolem 2300 nm, což by nasvědčovalo tomu, že se jedná o křemičitany (Herold, et al., 2004).

Terénní spektra z měření jsou na Obr. 22. Většina materiálů z laboratorních spekter, byla zaměřena i optickým kabelem. Spektra asfaltu jsou opět zařazena do tří kategorií: červeně – nový asfalt, modře – středně starý asfalt a zeleně – asfalt s příměsí křemene. U terénních spekter je vidět z Obr. 22, že jako nový asfalt byl určen pouze ten na parkovišti Spartak a u vleku, pro který však není k dispozici laboratorní spektrum (viz Obr. 21). Laboratorních spekter nového asfaltu bylo celkem šest, jak je vidět z Obr. 21, proto lze usoudit, že u terénních spekter zvyšuje odrazivost asfaltu atmosféra a sluneční svit.



Obr. 22 Spektrální křivky komunikací v Rokytnici nad Jizerou měřené optickým kabelem (zdroj: vlastní zpracování)



Obr. 23 *Spektrální křivky povrchu komunikací z měření optickým kabelem, kontaktní sondou a ze snímku (zdroj: vlastní zpracování)*

Pro území Rokytnice nad Jizerou byla ještě vytvořena spektrální knihovna materiálů komunikací pořízených ze snímku, kde bylo odebráno 16 spekter asfaltu, 2 spektra pro beton a 3 spektra pro šterk. Na Obr. 23 jsou spektrální křivky materiálů z laboratorních, terénních a obrazových spekter. Laboratorní spektra jsou bez vlivu atmosféry, tj. jejich spektrální křivky jsou relativně „hladké“. Terénní spektra mají vyšší odrazivost než laboratorní spektra. Obrazová spektra mají nejvyšší odrazivost. I přesto, že snímky jsou po atmosférické korekci, tak vliv atmosféry nebyl stoprocentně odstraněn, proto jsou křivky méně vyhlazené.

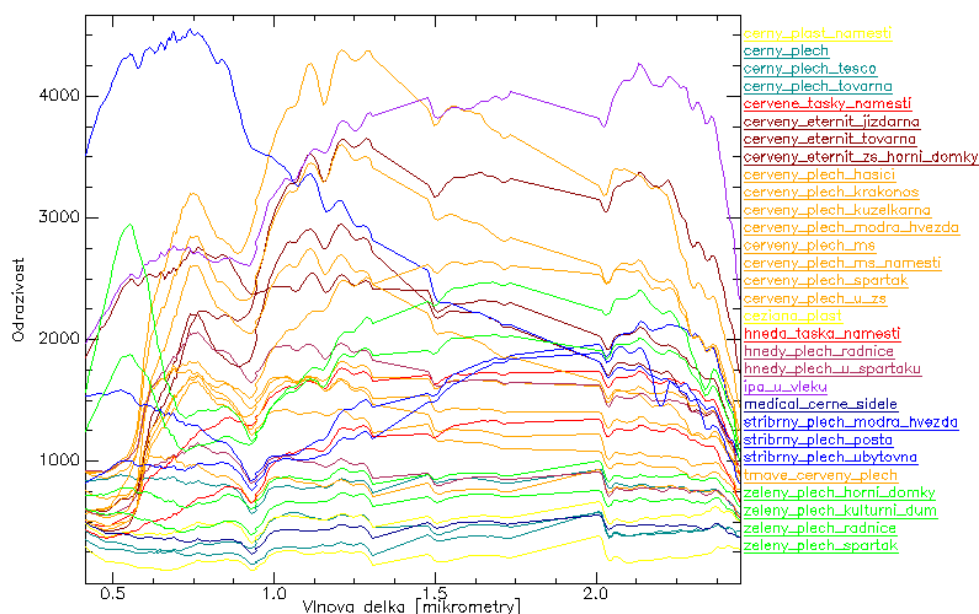
Spektrální knihovna střešních materiálů

Spektrální knihovna střešních materiálů byla získána odběrem spekter ze snímku. V terénu bylo zjištěno 10 typů střech: plastové střechy, černý plech, červené tašky, červený eternit, červený plech, hnědý plech, asfaltová lepenka (IPA), černé šindele, stříbrný plech, zelený plech (viz Obr. 24).

U plechových střech se liší odrazivost ve VIS podle barvy nátěru. Černý plech nemá výrazné lokální maximum odrazivosti, červený plech má lokální maximum odrazivosti v červené části viditelného spektra, zelený plech má lokální maximum odrazivosti v zelené části viditelného spektra a stříbrný plech nemá lokální maximum odrazivosti ve viditelné části spektra. Plechové střechy se neliší jen barvou, ale také materiálem, ze kterého jsou složeny. Stříbrné plechy jsou podle absorpce kolem 1000 nm pozinkované. Ostatní plechy nelze ze spektrální křivky určit.

Červená taška je nejspíše pálená, jelikož má méně výrazné maximum na vlnové délce kolem 860 nm. Eternitové střechy mají lokální minimum kolem 900 nm. Mezi 900 nm a 1300 nm odrazivost eternitových střech roste, poté opět klesá. IPA jako střešní krytina byla identifikována zejména na starých průmyslových objektech. Spektrální křivka má od 400 nm do 900 nm konkávní tvar. Od 900 nm roste odrazivost až do 1500 nm, poté je její odrazivost

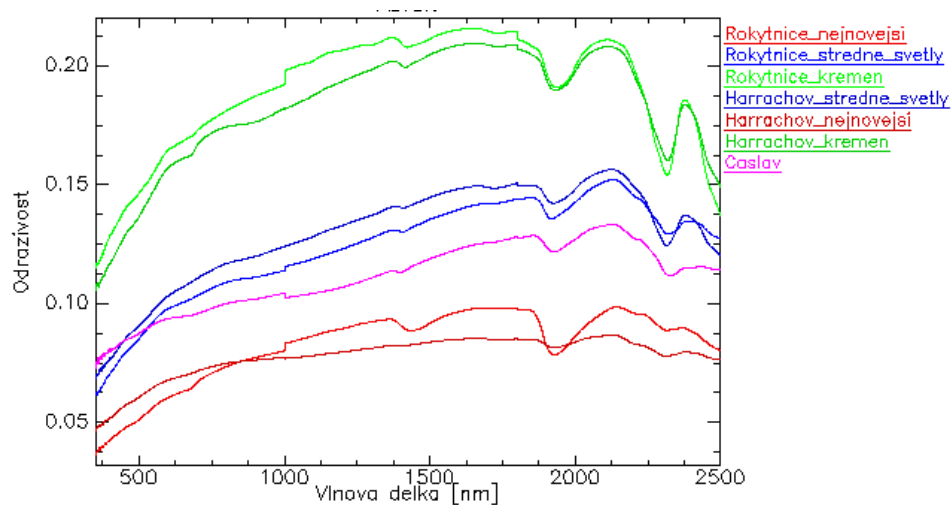
konstantní až do 2000 nm, kde dochází k opětovnému nárůstu odrazivosti do 2200 nm. Do 2500 nm pak odrazivost klesá.



Obr. 24 Spektrální křivky střechních krytin z Rokytnice nad Jizerou (zdroj: vlastní zpracování)

4.4 Porovnání spektrálních knihoven z jednotlivých území

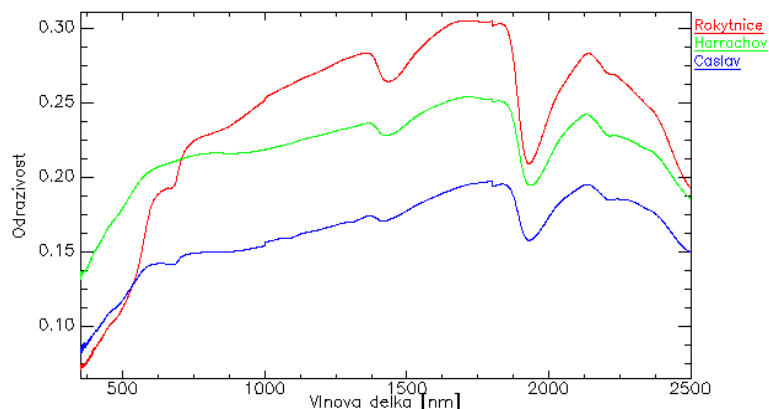
Spektra asfaltu a betonu byla pořízena pomocí kontaktní sondy, která zajišťuje stejné podmínky měření. Ze spektrálních křivek příslušející kategoriím asfaltu bylo spočítáno průměrné spektrum, jak pro obě území Krkonoš, tak pro území Čáslavi. Ze spektrálních křivek je patrné, že by bylo možné zaměnit spektra mezi všemi územími. Průběh spektrálních křivek se liší pouze v celkové odrazivosti.



Obr. 25 Spektrální křivky asfaltu (zdroj: vlastní zpracování)

Pro zájmová území bylo také spočítáno průměrné spektrum betonu. Jednotlivá spektra se liší celkovou odrazivostí. Nejvyšší odrazivost má spektrum z Rokytnice nad Jizerou. Tvar spektrální křivky na vlnových délkách 600 – 750 nm je ovlivněn započtením spektra červeného betonu do průměru.

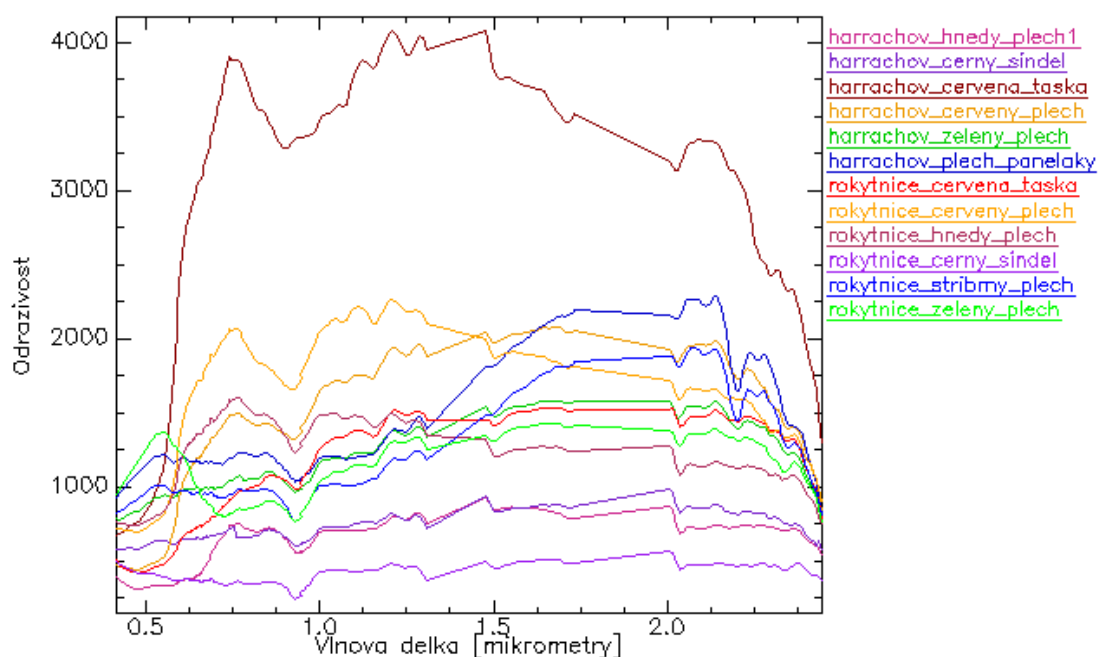
Někteří autoři uvádějí, že s rostoucím stářím betonu roste odrazivost do delších vlnových délek (Nasarudin, Shafri, 2011). Toto tvrzení nelze v našem případě potvrdit, protože zájmová území nedisponovala dostatečným počtem měření.



Obr. 26 Spektrální křivka betonu (zdroj: vlastní zpracování)

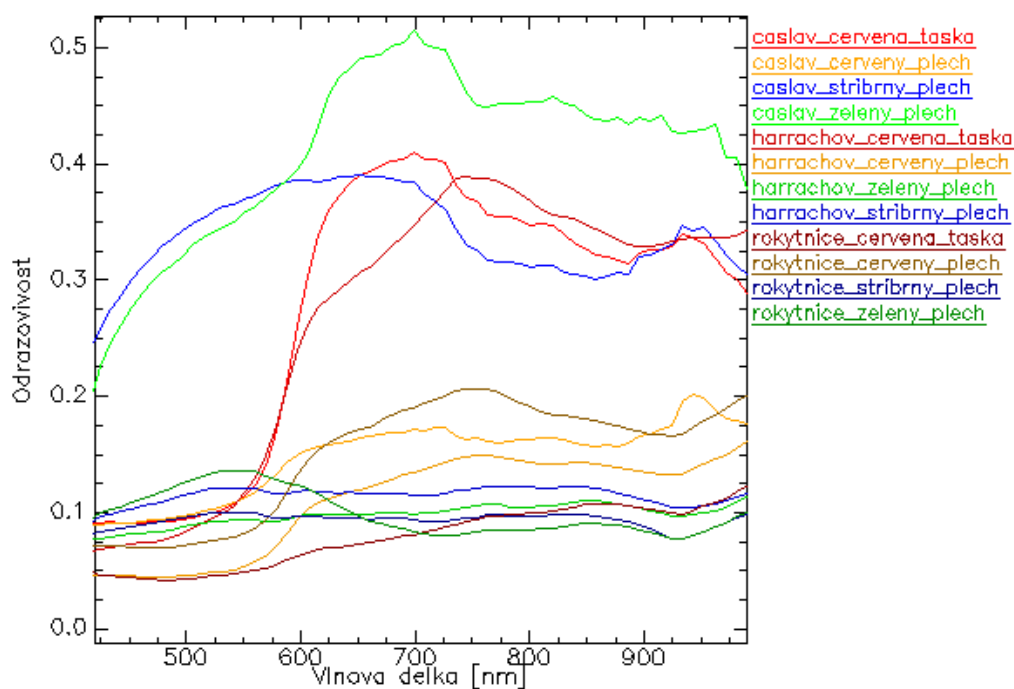
Spektrální knihovna střešních materiálů

Další skupinou spektrálních křivek, jsou střešní krytiny. V jednom grafu (viz Obr. 27) jsou zobrazeny spektrální křivky materiálů ze dvou různých území – Harrachov a Rokytnice nad Jizerou. Spektrální křivky byly získány přímo z obrazu. Většina materiálů má podobné spektrální charakteristiky. Nejméně podobná si jsou spektra červených tašek, což může být dáno nedostatečným odlišením betonové tašky od pálené tašky. Dalším důvodem může být neodhadnuté stáří střešní krytiny. U ostatních střešních krytin je možné říci, že rozdíly v odrazivosti jsou dány zejména odlišnými světelnými podmínkami, jelikož rozdíly jsou zejména v celkové odrazivosti nikoliv v průběhu spektrální křivky.



Obr. 27 Spektrální křivky střešních krytin pro Harrachov a Rokytnici nad Jizerou (zdroj: vlastní zpracování)

Spektra střešních krytin z Čáslavi, která byla získána ze snímku, mají menší spektrální rozsah než spektra střešních krytin z území Rokytnice nad Jizerou a Harrachova. Spektra z území Harrachova a Rokytnice nad Jizerou byla převzorkována do spektrálního rozsahu senzoru AISA (viz Obr. 28). Stříbrné střechy z území Rokytnice nad Jizerou a Harrachova mají podstatně nižší odrazivost než stříbrné střechy z území Čáslavi, stejně tak tomu je u zeleného plechu. Podobné spektrální chování má pálená taška z Čáslavi a z Harrachova. O dost nižší odrazivost má spektrální křivka z oblasti Rokytnice nad Jizerou. Červený plech má na všech třech územích podobnou odrazivost. Různé spektrální projevy mohou být dány zejména různorodostí materiálů střešních krytin a různými podmínkami při pořízení dat.



Obr. 28 Spektrální křivky střešních krytin z území Harrachova, Rokytnice nad Jizerou a z Čáslavi
(zdroj: vlastní zpracování)

4.5 Vizuální interpretace klasifikací a zhodnocení přesnosti

Z výsledných klasifikací metodami LSU, MESMA, SAM a SID a ze spektrálních knihoven laboratorních, terénních, obrazových a spekter PPI byly vytvořeny mapy, které jsou v Příloha 8 Příloha 16. V jedné mapě se vyskytují klasifikované obrazy metodami LSU, MESMA, SAM a SID a z jednoho typu spekter. Pro vizualizaci výsledných klasifikací byly vybrány pouze reprezentativní výřezy s největší hustotou zástavby a rozmanitostí antropogenních materiálů. Z klasifikací celého snímku totiž nebylo téměř nic rozpoznatelné. V Čáslavi takové území představovalo náměstí a jeho okolí, které leží v centru města (viz Příloha 22). V Harrachově bylo tvořeno okolím pivovaru jižně od silnice I. třídy směřující do Polska (viz Příloha 21). V Rokytnici nad Jizerou byl výběr složitější, jelikož celá obec je protažena ve směru hlavní komunikace. Nejvhodnějším územím pro vytvoření výřezu bylo Dolní náměstí a jeho okolí, kde je situováno několik větších budov a dvě parkoviště (viz Příloha 20). Pro klasifikace zájmových území, které dosahovaly nejvyšších přesností, byly vytvořeny samostatné mapy, které jsou v Příloha 17 Příloha 19.

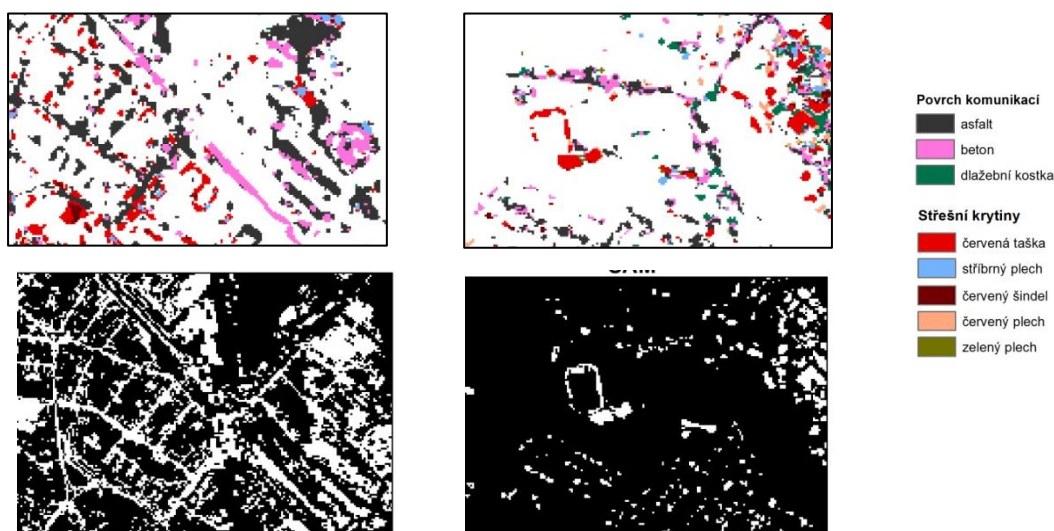
Do hodnocení přesnosti bylo zahrnuto vizuální porovnání klasifikací a srovnání vstupních dat v rámci jednoho klasifikačního algoritmu. Mezi jednotlivými klasifikacemi jsou patrné rozdíly i vizuálním srovnáním.

Přesnost klasifikace byla hodnocena na základě dvou metod uvedených v předcházející kapitole 3.3.7 : celková přesnost a podíl klasifikovaných pixelů. Celková přesnost klasifikace může být ovlivněna sběrem kontrolních členů. Při terénním průzkumu určeném pro sběr

kontrolních členů nebyly všechny silnice prochozeny a ani nebylo možné obejít všechny budovy. V Google Street View nejsou všechny ulice nasnímány, a proto nebyly některé silnice ani budovy pro hodnocení přesnosti použitelné. Výběr kontrolních bodů tak byl omezen.

Při sběru kontrolních bodů z Google Street View bylo také zjištěno, že výběr klasifikovaných tříd byl nedostatečný. V území Čáslavi by bylo třeba přidat do spektrálních knihoven spektrum eternitu a pro klasifikaci území Rokytnice nad Jizerou spektrum šedého eternitu.

Nedokonalostí masky komunikací a střešních krytin pro území Čáslavi byl uměle zvýšen podíl klasifikovaných pixelů. Stejná maska komunikací a střešních krytin pro území Čáslavi byla použita jak pro klasifikace, tak pro hodnocení přesnosti. Klasifikačními algoritmy byly klasifikovány nejen komunikace a budovy, ale také povrchy, které nejsou těmito materiály tvořeny. Na Obr. 29 vlevo nahoře je klasifikace metodou LSU z obrazových spekter, kde byla železniční trať klasifikována jako beton. Na Obr. 29 vlevo dole je pak maska komunikací, která zahrnuje právě i železniční trať. Na Obr. 29 vpravo je klasifikace metodou SID z obrazových spekter, ve které byla klasifikována tartanová dráha jako červená střecha a vpravo dole je znázorněna maska budov, která zahrnuje právě tartanovou dráhu.



Obr. 29 Chybné klasifikace vlivem nedokonalostí masky povrchů komunikací (vlevo) a typů střešních krytin (vpravo) v Čáslavi (zdroj: vlastní zpracování)

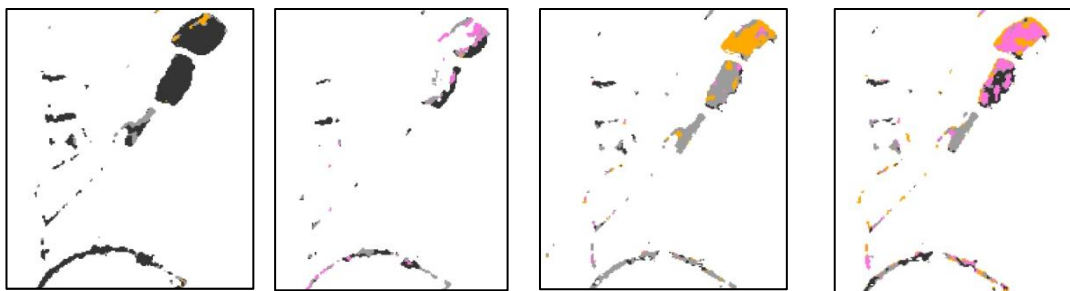
Spektra měřená kontaktní sondou jsou v dalším textu nazývána jako laboratorní spektra, spektra měřená optickým kabelem jako terénní spektra, spektra odebraná ze snímku jako obrazová spektra a spektra získaná z PPI indexu jako spektra PPI.

4.5.1 Zhodnocení přesnosti klasifikací z území Rokytnice nad Jizerou

Laboratorní spektra povrchu komunikací

V klasifikaci komunikací na základě *laboratorních spekter* metodou MESMA bylo klasifikováno nejméně pixelů, naopak nejvíce metodou LSU, jak je vidět v Tab. 10 a v Příloha 8. V klasifikacích (viz Příloha 8) jsou znázorněny silnice a jižní parkoviště, které jsou ve skutečnosti tvořeny asfaltem a severní parkoviště, které je ve skutečnosti tvořeno betonem. Celková přesnost klasifikace je snížena záměnami jednotlivých tříd povrchu komunikací mezi sebou. Nejnížší celkové přesnosti dosahuje metoda MESMA (13 %) a nejvyšší metoda SID (44 %). Ačkoliv bylo pomocí metody LSU klasifikováno 92 % pixelů, její celková přesnost byla pouhých 35 %.

Na Obr. 30 je klasifikace metodami LSU, MESMA, SAM a SID šterkových parkovišť v části nazývané Horní Domky. Z Obr. 30 je patrné, že klasifikační algoritmy zaměnily šterk za ostatní povrchy komunikací. Na Obr. 30 je také vidět, že komunikace, která má být tvořena asfaltem byla klasifikována metodou MESMA jako asfalt s příměsí křemene a částečně jako beton. Asfalt byl téměř všude zaměněn za asfalt s příměsí křemene. Asfalt byl metodou SID klasifikován na povrchu komunikace jako beton.



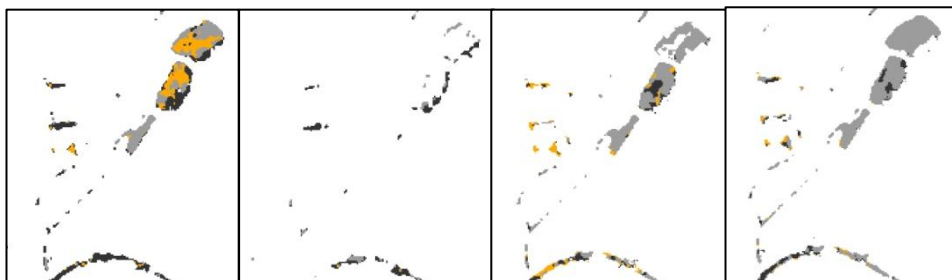
Obr. 30 Šterková parkoviště Horní Domky klasifikovaná metodami LSU, MESMA, SAM a SID z laboratorních spekter (zdroj: vlastní zpracování)

Terénní spektra povrchu komunikací

Klasifikace na základě *terénních spekter* mají nižší počet klasifikovaných pixelů než z laboratorních spekter, jak je vidět z Tab. 10. V Příloha 9 byly povrchy komunikací a parkovišť všemi klasifikačními algoritmy zařazeny do tříd, které je ve skutečnosti tvoří, proto i celková přesnost klasifikace je u všech klasifikačních algoritmů nižší než 50%. Ve všech klasifikacích byla zaměňována třída asfalt s příměsí křemene se šterkem. I přesto je celková přesnost klasifikace vyšší než u klasifikací z laboratorních spekter (viz Tab. 10), u kterých byly mnohem častěji zaměňovány všechny třídy mezi sebou (viz Obr. 30 a Příloha 8).

Na Obr. 31 jsou znázorněny klasifikace šterkových parkovišť z oblasti Horních Domků. LSU jako jediný klasifikační algoritmus klasifikoval povrch parkovišť jako šterk. Ostatní klasifikátory šterk určily jako asfalt s příměsí křemene. Metoda SAM nejvíce zaměňovala asfalt

za štěrk. Byly tak klasifikovány téměř veškeré silnice. Metoda LSU zaměňovala zejména asfalt za asfalt s příměsí křemene.



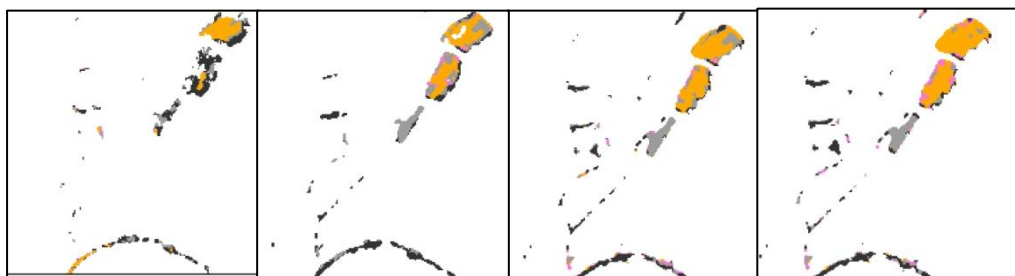
Obr. 31 Štěrková parkoviště Horní Domky klasifikovaná metodami LSU, MESMA, SAM a SID z terénních spekter (zdroj: vlastní zpracování)

Obrazová spektra povrchu komunikací

S využitím *obrazových spekter* byly klasifikovány jak povrchy komunikací, tak i střešní krytiny, jak je vidět v Příloha 10. Metody LSU, MESMA a SAM klasifikovaly za využití obrazových spekter méně pixelů komunikací než z laboratorních a terénních spekter (viz Tab. 10). Naopak pomocí metody SID bylo klasifikováno o 10 % pixelů víc (viz Tab. 10). V klasifikovaných obrazech v Příloha 10 byl povrch komunikace a jižního parkoviště u klasifikačních algoritmů MESMA, SAM a SID určen správně jako třída asfalt, ale u klasifikace metodou LSU byla komunikace zaměněna za třídu štěrk a jižní parkoviště nebylo klasifikováno vůbec. Severnímu parkovišti žádný klasifikátor nepřidal třídu beton.

Třída povrchu komunikace byla nejméně zaměňována v klasifikacích z obrazových spekter, jak je vidět i z Obr. 31Obr. 33 a z Příloha 8 -Příloha 10. Celková přesnost klasifikací MESMA, SAM z obrazových spekter byla přes 60 %. Metoda SID klasifikovala obraz s celkovou přesností 71,74 %. Nejčastěji ve všech klasifikacích byla zaměňována třída štěrk za všechny ostatní třídy povrchu komunikací. Příčinou může být podobné složení asfaltu s příměsí křemene a štěrku, který na plochách v Rokytnici nad Jizerou je tvořen taktéž křemenem.

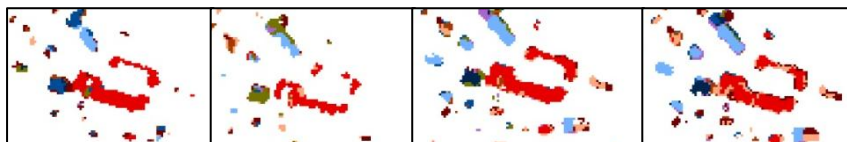
Na Obr. 32 jsou znázorněna štěrková parkoviště v oblasti Horních Domků. Kromě klasifikačního algoritmu LSU je všechny klasifikační algoritmy zařadily do správné třídy. Metoda LSU je klasifikovala z části jako štěrk a z části jako asfalt.



Obr. 32 Štěrková parkoviště Horní Domky klasifikovaná metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter (zdroj: vlastní zpracování)

Obrazová spektra typů střešních krytin

Nejméně pixelů střešních krytin z *obrazových spekter* bylo klasifikováno metodou MESMA, naopak nejvíce metodou SID, jak je vidět v Tab. 10 a v Příloha 10. Metoda LSU neklasifikovala střechy pokryté asfaltovou lepenkou. Metody MESMA a LSU také klasifikovaly pouze osvětlenou část sedlových střech na rozdíl od metod SAM a SID. Celková přesnost všech klasifikací je přes 50 %. Metody SAM a SID mají celkovou přesnost 78,5 a 83 %. Typ střešní krytiny na celé střeše dokázala určit metoda SID, kdežto metoda SAM klasifikovala pixely uprostřed střech jako jiný typ nebo jej neklasifikovala vůbec.



Obr. 33 Klasifikace červené tašky na Horním náměstí metodami LSU, MESMA, SAM a SID z *obrazových spekter* (zdroj: vlastní zpracování)

Červená taška se nacházela pouze na budovách Horního náměstí. Klasifikace této střešní krytiny z *obrazových spekter* je na Obr. 33. Metoda MESMA klasifikovala méně pixelů červené tašky než ostatní klasifikační algoritmy.

Tab. 10 Výsledky hodnocení přesnosti klasifikací zájmového území Rokytnice nad Jizerou (zdroj: vlastní zpracování)

Typ zastavěné plochy	metoda	vstupní data (spektra)	podíl klasifikovaných pixelů [%]	celková přesnost [%]
komunikace	LSU	laboratorní	92,00	35,56
		terénní	76,00	43,37
		obrazová	51,00	35,85
	MESMA	laboratorní	49,00	13,04
		terénní	38,00	34,48
		obrazová	33,00	61,25
	SAM	laboratorní	52,00	37,50
		terénní	46,00	48,57
		obrazová	67,00	65,56
	SID	laboratorní	73,00	44,83
		terénní	71,00	46,43
		obrazová	80,00	71,74

Typ zastavěné plochy	metoda	vstupní data (spektra)	podíl klasifikovaných pixelů [%]	celková přesnost [%]
střešní krytiny	LSU	obrazová	57,00	52,13
	MESMA	obrazová	46,00	54,43
	SAM	obrazová	54,00	78,50
	SID	obrazová	82,00	83,85

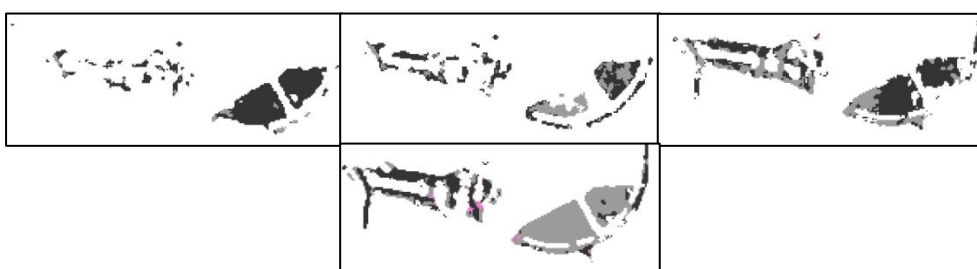
Světle šedá pole znázorňují hodnoty vyšší než 70%.

4.5.2 Zhodnocení přesnosti klasifikace z území Harrachova

Laboratorní spektra pokryvů komunikací

V klasifikaci povrchu komunikací na základě *laboratorních spekter* bylo nejvíce pixelů klasifikováno metodou SID a naopak nejméně metodou MESMA, jak je vidět z Tab. 11 a Příloha 11. V klasifikacích v Příloha 11 jsou znázorněna silnice I. třídy a západní parkoviště. Ty jsou ve skutečnosti tvořeny třídou asfalt. Třídy povrchu komunikací nebylo možné posoudit v areálu pivovaru, který leží na sever od této silnice. Nejčastěji klasifikační algoritmy LSU, SAM a SID zaměňovaly asfalt za třídu asfalt s příměsí křemene a ten za třídu beton (viz Příloha 11). Celková přesnost klasifikace z laboratorních spekter nepřesáhla 60 %. Nejvyšší přesnosti dosahovala klasifikace pomocí klasifikačního algoritmu MESMA, tj. 59,46 %.

Na Obr. 34 je zobrazena klasifikace autobusového nádraží v Harrachově, které je ve skutečnosti tvořeno asfaltem a asfaltem s příměsí křemene. Přilehlá dvě parkoviště jsou ve skutečnosti pokryta třídou s označením asfalt. Dva typy asfaltu na autobusovém nádraží klasifikovaly pouze metody SID a SAM a přilehlá parkoviště jako asfalt pouze metoda LSU.



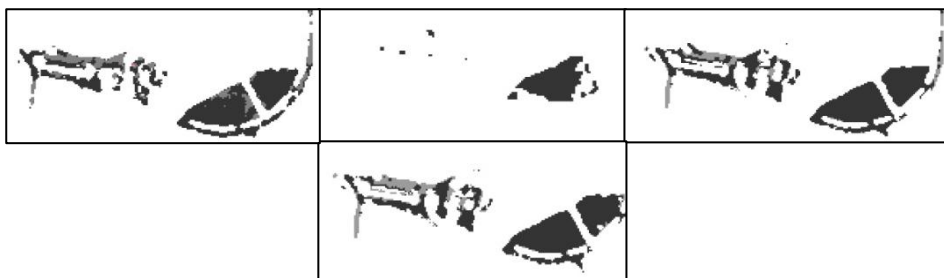
Obr. 34 Klasifikace autobusového nádraží metodami LSU, MESMA, SAM a SID z laboratorních spekter (zdroj: vlastní zpracování)

Spektra PPI pokryvu komunikací

Klasifikace pomocí *spekter z PPI* byla mezi klasifikačními algoritmy velmi rozdílná (viz Příloha 12). Nejméně povrchu komunikací bylo klasifikováno metodou MESMA, tj. 6 %, což je nejméně ze všech 56 klasifikací. Nejvíce pixelů bylo zařazeno mezi klasifikované metodou SID (78 %). Celkově pomocí spekter z PPI bylo klasifikováno více pixelů než pomocí

laboratorních spekter, jak je vidět z Tab. 11. Třída asfalt byla na některých místech zaměněna metodou SID a metodou LSU za asfalt s příměsí křemene, což snížilo celkovou přesnost klasifikací (SID: 60,19 % a LSU 62,5 %). Metoda MESMA má 100% celkovou přesnost klasifikace, což je dáno způsobem hodnocení, kdy byly vypuštěny neklasifikované pixely z výpočtu celkové přesnosti. Na druhou stranu, jak už bylo zmíněno výše, bylo klasifikováno pouze 6 % obrazu, proto je klasifikace nevhodná. Nejvhodnější klasifikací povrchu komunikací podle celkové přesnosti tak byla metoda SAM s 66, 67 %.

Na Obr. 35 jsou zobrazeny klasifikace autobusového nádraží metodami LSU, MESMA, SAM a SID. Metoda MESMA neklasifikovala povrch komunikací na autobusovém nádraží. Metody LSU, SAM a SID klasifikovaly správně dva typy asfaltu.

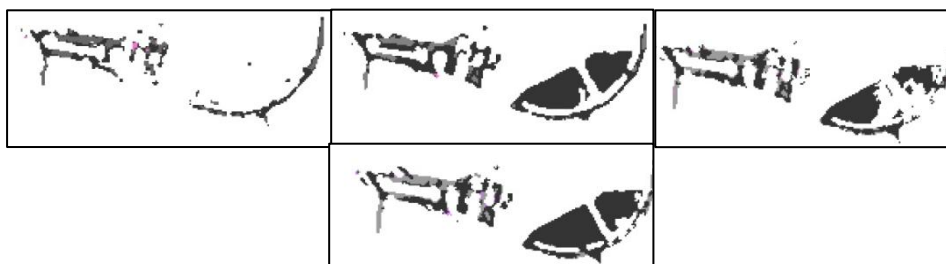


Obr. 35 Klasifikace autobusového nádraží v Harrachově metodami LSU, MESMA, SAM a SID ze spekter PPI (zdroj: vlastní zpracování)

Obrazová spektra povrchu komunikací

Metody LSU, SAM a SID klasifikovaly nižší procento povrchu komunikací v obraze z *obrazových spekter* než ze spekter PPI, jak je vidět v Tab. 11. Celková přesnost klasifikací je však vyšší. Metody určily tentokrát správně silnici I. třídy a západní parkoviště jako asfalt a vedlejší silnici jako asfalt s příměsí křemene (viz Příloha 13), což zvýšilo celkovou přesnost klasifikací. Metody SAM, SID a MESMA klasifikovaly povrch komunikací s celkovou přesností kolem 80 %, metoda LSU s přesností 68,49 % (viz Tab. 11).

Na Obr. 36 jsou znázorněny klasifikace autobusového nádraží metodami LSU, MESMA, SAM a SID. Klasifikace metodou LSU neklasifikovala parkoviště. Ostatní metody klasifikovaly jak parkoviště, tak dva typy asfaltu na autobusovém nádraží. Metoda SAM klasifikovala pouze část povrchu parkoviště.

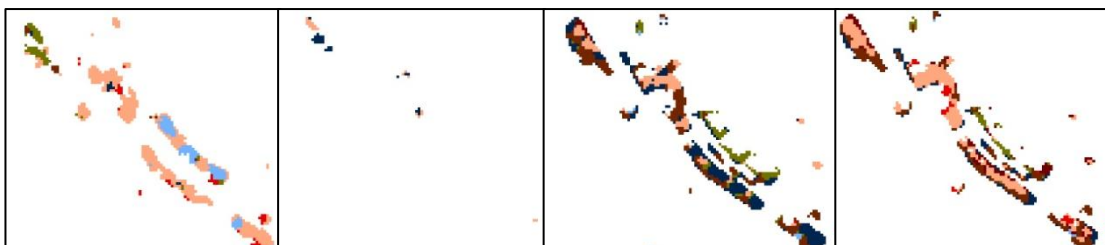


Obr. 36 Klasifikace autobusového nádraží v Harrachově metodami LSU, MESMA, SAM a SID z *obrazových spekter* (zdroj: vlastní zpracování)

Spektra PPI typů střešních krytin

Nejmenší podíl klasifikovaných pixelů (5 %) střešních krytin ze *spekter PPI* bylo opět metodou MESMA (viz Tab. 11 a Příloha 12). Nejvíce pixelů bylo klasifikováno metodou SID, a to 62 %. Žádnou klasifikační metodou nebylo dosaženo více jak 45% celkové přesnosti. V metodách SAM a SID byla nejčastěji zaměňována červená taška za červený plech, zelený plech za stříbrný plech a červený šindel za červenou tašku. Pomocí klasifikačního algoritmu LSU byly dokonce označeny všechny střechy jako červený plech a také byly klasifikovány jen osvětlené části střech, což snížilo přesnost klasifikace (viz Příloha 12).

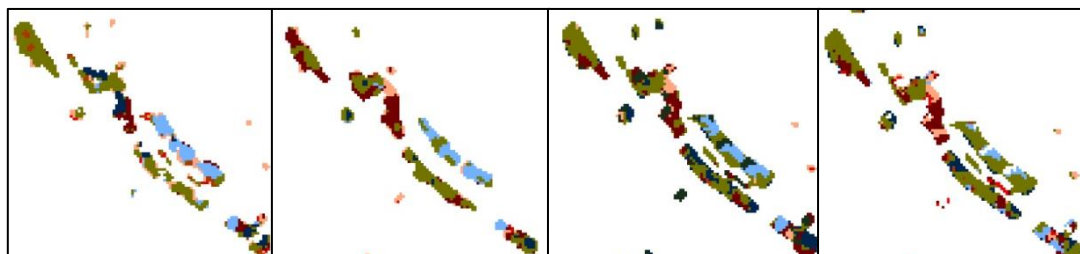
Na Obr. 37 je znázorněna klasifikace střešních krytin z náměstí v Harrachově. Ve skutečnosti je střecha do půloblouku pokryta červenými šindeli a střecha jižně od ní černými šindeli. Černé šindeli byly klasifikovány správně pouze metodou SAM. Červené šindeli metoda SAM klasifikovala pouze z části správně. Metoda LSU a SID klasifikovaly tyto střechy jako červený plech.



Obr. 37 Klasifikace střešních krytin na náměstí v Harrachově metodami LSU, MESMA, SAM a SID ze spekter PPI (zdroj: vlastní zpracování)

Obrazová spektra typů střešních krytin

V metodách LSU, MESMA a SID bylo klasifikováno více pixelů střešních krytin z *obrazových spekter* než ze spekter PPI a v klasifikaci metodou SAM naopak méně (viz Tab. 11). Celková přesnost klasifikace střešních krytin je vyšší u obrazových spekter než u spekter z PPI (viz Tab. 11). Metody SAM a SID mají celkovou přesnost vyšší než 70 %. V obou klasifikacích byl však zaměňován červený plech za červený šindel (viz Příloha 13). V klasifikacích MESMA a LSU byly navíc zaměňovány i červený plech, zelený plech a černý šindel.



Obr. 38 Klasifikace střešních krytin na náměstí v Harrachov metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter (zdroj: vlastní zpracování)

Na Obr. 38 je znázorněna klasifikace střešních krytin na náměstí metodami LSU, MESMA, SAM a SID. Všechny metody klasifikovaly střešní krytinu na budově do půlkruhu pouze z části správně, jako červené šindele. Černé šindele nebyly klasifikovány správně ani jednou z metod.

Tab. 11 Výsledky hodnocení přesnosti klasifikací na území Harrachova (zdroj: vlastní zpracování)

Typ zastavěné plochy	metoda	vstupní data (spektra)	Podíl klasifikovaných pixelů [%]	celková přesnost [%]
komunikace	LSU	laboratorní	44,18	46,81
		PPI	75,00	62,50
		obrazová	63,00	68,49
	MESMA	laboratorní	32,00	59,46
		PPI	6,00	100,00
		obrazová	63,00	79,79
	SAM	laboratorní	34,00	51,35
		PPI	77,00	66,67
		obrazová	57,00	83,16
	SID	laboratorní	75,00	36,54
		PPI	78,00	60,19
		obrazová	77,00	82,86
Střešní krytiny	LSU	obrazová	71,00	55,07
		PPI	59,00	26,56
	MESMA	obrazová	54,00	65,22
		PPI	5,00	25,00
	SAM	obrazová	47,00	70,37
		PPI	57,00	43,59
	SID	obrazová	73,00	75,51
		PPI	62,00	37,18

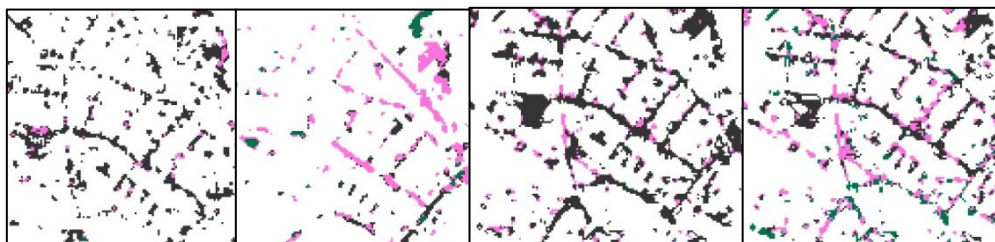
Světle šedá pole znázorňují hodnoty vyšší než 70%.

4.5.3 Zhodnocení přesnosti klasifikace z území Čáslavi

Laboratorní spektra pokryvu komunikací

Podíl klasifikovaných pixelů u klasifikací z *laboratorních spekter* byl u metod SAM a SID nejvyšší a u metody MESMA nejnižší, jak je vidět z Tab. 12 a Příloha 14. V Příloha 14 je znázorněno Čáslavské náměstí, které je ve skutečnosti pokryto dlažební kostkou. Přilehlá severní ulice je tvořena asfaltem a ulice směřující na jih od náměstí betonem. Jižní ulici jako beton klasifikovaly správně metody SAM a SID a náměstí jako dlažební kostku pouze metoda SID. Severní asfaltová ulice byla správně klasifikována metodou SAM. V metodách MESMA a SID byl zaměňován asfalt za beton a v metodách LSU a SAM dlažební kostka za asfalt, čímž byla snížena celková přesnost klasifikací. Ta se pohybovala u metod LSU a SID kolem 50 % a u metody MESMA kolem 8 %. Nejpřesnější klasifikací byla metoda SAM se 78,67 %. Všechny klasifikační algoritmy klasifikovaly železniční trať nacházející se na severovýchodě vybraného území jako asfalt nebo v případě algoritmu MESMA jako beton.

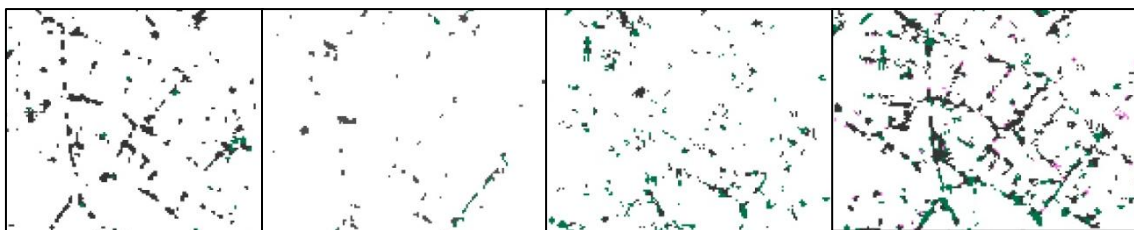
Na Obr. 39 jsou zobrazeny klasifikace ulic severně od náměstí a severovýchodně od hlavního nádraží v Čáslavi. Metoda MESMA klasifikovala veškeré ulice jako betonové. Ve skutečnosti jsou však tvořeny asfaltem. Více betonových ploch než ve skutečnosti existuje, se objevuje i v klasifikaci metodou SID.



Obr. 39 Klasifikace ulic Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID z laboratorních spekter
(zdroj: vlastní zpracování)

Spektra PPI povrchu komunikací

Ze *spekter PPI* nebyly klasifikovány téměř žádné komunikace. Klasifikační algoritmy LSU a SID klasifikovali přibližně 40 % povrchu komunikací a MESMA a SAM kolem 20 %, jak je vidět z Tab. 12. Z laboratorních spekter bylo klasifikováno více pixelů než z PPI spekter (viz Obr. 39 a 40). Náměstí bylo všemi klasifikátory určeno správně jako třída kostka (viz Příloha 15). Pomocí metod SAM a SID byly klasifikovány ulice jako dlažební kostka, což snížilo jejich celkovou přesnost klasifikace. Metody MESMA a LSU mají méně klasifikovaných pixelů, ale celková přesnost je vyšší (viz Tab. 12). Ani jeden z klasifikátorů neklasifikoval železniční trať.



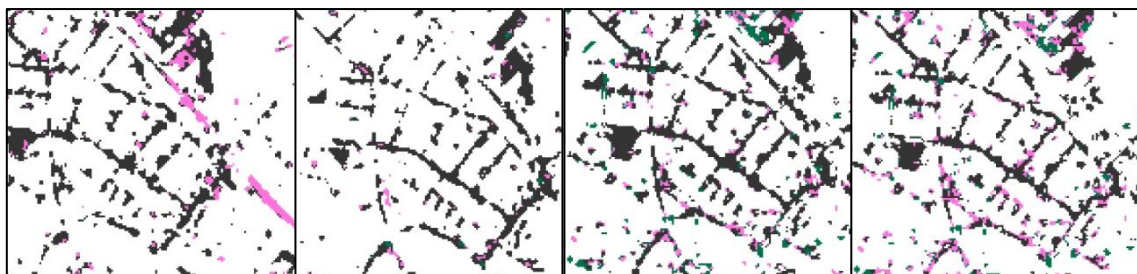
Obr. 40 Klasifikace ulic Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID ze spekter PPI (zdroj: vlastní zpracování)

Na obrázku 40 jsou znázorněny klasifikace ulic metodami LSU, MESMA, SAM a SID. Pouze v klasifikaci metodou SID je znatelná síť ulic, ostatními metodami nebylo téměř nic klasifikováno. Metoda SID, ale klasifikovala komunikace i jako dlažební kostku, i když ve skutečnosti byly tvořeny asfaltem.

Obrazová spektra povrchu komunikací

Klasifikátory z *obrazových spekter* vyklasifikovaly nejvíce pixelů povrchu komunikací, jak je vidět v Tab. 12. V Příloha 16 je znázorněna klasifikace náměstí a přilehlých ulic. Náměstí bylo označeno jako dlažební kostka všemi klasifikátory. Metody SAM a SID určily správně jižní ulici jako beton. Klasifikátory MESMA a SID severní ulici stanovily jako kostku a klasifikátor SAM jako beton, ačkoliv ve skutečnosti je tvořena asfaltem. Celkovou přesnost klasifikace metodou SID snižuje mnoho ulic klasifikovaných jako beton (viz Příloha 16). Ve všech klasifikacích byla klasifikována železniční trať, a to jako beton v metodě LSU a jako asfalt v ostatních metodách. Celková přesnost klasifikací metodami LSU a SID nepřesahuje 60 %, metodou MESMA 70 %. Celková přesnost klasifikace metodou SAM byla nejvyšší, a to 72,73 %, jak je vidět v Tab. 12.

Na Obr. 41 jsou znázorněny klasifikace ulic severně od náměstí z metod LSU, MESMA, SAM a SID. Metoda SID klasifikovala v síti ulic mnoho pixelů jako beton, i když se ve skutečnosti jednalo o asfaltové povrchy. Metody LSU a MESMA neklasifikovaly takové množství pixelů, proto je síť ulic v klasifikacích méně výrazná než v klasifikaci metodou SAM.

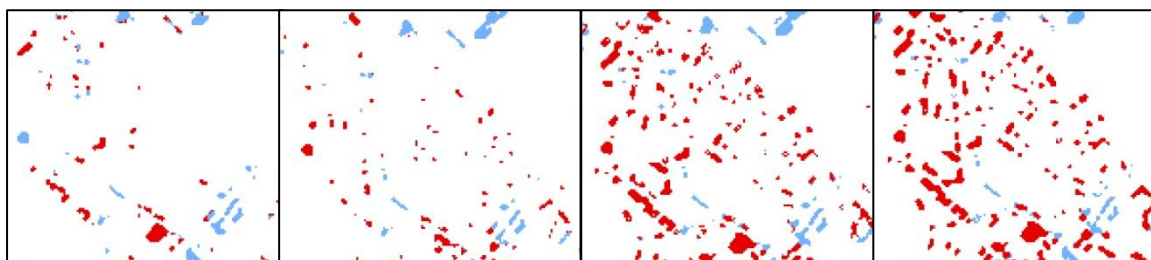


Obr. 41 Klasifikace ulic Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter (zdroj: vlastní zpracování)

Spektra PPI střešních krytin

Spektra PPI umožnila klasifikaci pouze dvou typů střešních krytin, a to červené střechy a stříbrné střechy. Červená střecha tak zahrnovala i třídy: červená taška, červený šindel a červený plech, které byly odlišeny z obrazových spekter, jak je vidět z Příloha 15 a Příloha 16. Metoda LSU zaměňovala třídu stříbrný plech za červenou střechu (viz Příloha 15). Metodami LSU, MESMA a SAM bylo klasifikováno méně než 60 % pixelů střešních krytin, metodou SID pak 85 %, jak je vidět v Tab. 12 a Příloha 15.

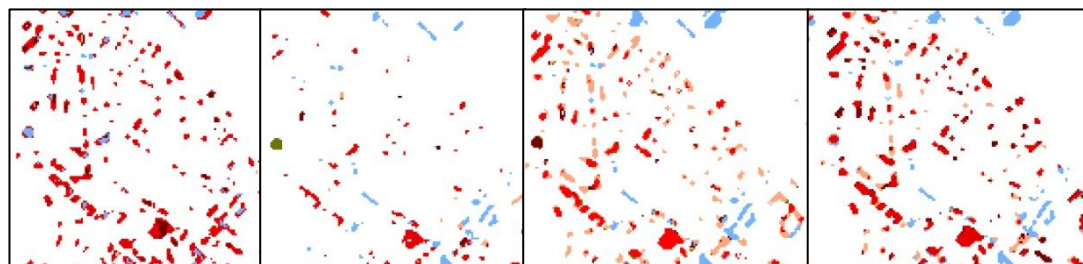
Na Obr. 42 jsou znázorněny klasifikace střešních krytin ležících na sever od náměstí v Čáslavi. Metody SAM a SID klasifikovaly více pixelů střech než metody LSU a MESMA.



Obr. 42 Klasifikace střešních krytin severně od náměstí v Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID z PPI spekter (zdroj: vlastní zpracování)

Obrazová spektra střešních krytin

Nejméně střešních krytin z *obrazových spekter* bylo vyklasifikováno metodou MESMA (viz Tab. 12). Celkově však bylo z obrazových spekter klasifikováno více pixelů než ze spekter PPI (viz Tab. 12). Metody MESMA, LSU a SID zaměňovaly třídu červený plech za červenou tašku a metoda LSU zaměňovala i třídu stříbrný plech za červenou tašku, čímž byla snížena přesnost klasifikace (viz Příloha 16). Celková přesnost klasifikace byla nejnižší u metody LSU (48,53 %) a nejvyšší u metody SAM (82,5 %). U metody SAM jsou dobře rozeznatelné jednotlivé střechy od sebe.



Obr. 43 Klasifikace střešních krytin severně od náměstí v Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter (zdroj: vlastní zpracování)

Na Obr. 43 je znázorněna klasifikace střešních krytin severně od náměstí v Čáslavi metodami LSU, MESMA, SAM a SID z obrazových spekter. Z těchto klasifikací lze potvrdit, že jsou zaměňovány třídy červený plech a červená taška metodami MESMA, LSU a SID.

Tab. 12 Výsledky hodnocení přesnosti klasifikací na území Čáslavi (zdroj: vlastní zpracování)

Typ zastavěného území	metoda	vstupní data	Podíl klasifikovaných pixelů [%]	celková přesnost [%]
komunikace	LSU	laboratorní	66,00	53,70
		PPI	48,00	79,59
		obrazová	70,00	57,97
	MESMA	laboratorní	42,00	8,11
		PPI	19,00	81,48
		obrazová	61,00	67,69
	SAM	laboratorní	54,00	78,67
		PPI	19,00	72,73
		obrazová	66,00	72,73
	SID	laboratorní	66,00	54,17
		PPI	40,00	70,45
		obrazová	60,00	54,17
Střešní krytiny	LSU	obrazová	86,00	48,53
		PPI	39,00	73,91
	MESMA	obrazová	55,00	81,82
		PPI	57,00	74,55
	SAM	obrazová	77,00	82,50
		PPI	57,00	80,65
	SID	obrazová	85,00	70,59
		PPI	85,00	73,44

Světle šedá pole znázorňují hodnoty vyšší než 65%.

5 SHRUTÍ A DISKUZE

5.1 Návrh metodiky detekce a klasifikace antropogenních materiálů

Hlavním cílem práce bylo navrhnout metodiku detekce a klasifikace antropogenních materiálů. Jeden z dílčích kroků, který byl řešen v rámci metodiky, byla volba vhodné masky antropogenních materiálů. Pro každé území byly zpracovány dvě masky – jedna pro komunikace a druhá pro budovy. Tento postup by měl zajistit větší přesnost klasifikace. Kvůli polohové přesnosti 2 m u použitých snímků ze senzoru APEX nebylo možné použít pouze data ZABAGED pro tvorbu masek komunikací a budov, ale bylo třeba je upravit pomocí vytvořené masky z NDVI.

Data ze senzoru AISA měla polohovou přesnost 20 m, proto nebylo možné data ZABAGED použít vůbec, avšak byl navržen postup, který umožnil odmaskování téměř veškeré vegetace, holé půdy a vodních ploch. Dále bylo nutné vyřešit, jak oddělit masku komunikací od masky střešních krytin. K rozřešení bylo využito poznatku z terénu, že téměř všechny střechy jsou z červené tašky či červeného plechu. Dále byl navržen index na základě maximální (červená) a minimální (zelená) odrazivosti těchto materiálů ve viditelné části spektra. Z masky povrchu komunikací nebyly odstraněny střechy z asfaltové lepenky. Masku střešních krytin neobsahovala jiné materiály než plech, šindel a tašku a ani jiné barvy než červenou a stříbrnou. Dále z masek nebyla odstraněna železniční trať a tartanová dráha. Tyto nedokonalosti masky způsobily chyby v hodnocení přesnosti.

Další dílčí těžkostí metodického postupu byla volba datového typu integer, který ušetří místo a čas při zpracování jednotlivých snímků, ale některé klasifikační algoritmy s ním nepracují zcela správně. Metoda MESMA pracuje pouze s datovým typem float. Metoda LSU vyžaduje převod i spektrální knihovny na datový typ integer, což je ve větším počtu spektrálních knihoven časově náročné na zpracování. Nastává tak otázka, zda vůbec data převádět z datového typu float na integer. Následujícím problematickým místem v nesouladu datových typů mezi používanými softwary ENVI a ArcGIS byl datový formát float integer použitý pro výslednou klasifikaci metody MESMA. Software ArcGIS nedokáže přečíst tento datový typ, proto bylo nutné převést výslednou klasifikaci na datový typ integer.

Při samotné klasifikaci bylo řešeno nastavení parametru maximálního povoleného úhlu u metody SAM a maximální povolené divergence u metody SID pro klasifikaci komunikací. Při klasifikaci se stejnou hodnotou omezující podmínky pro všechny materiály docházelo k záměnám jednotlivých materiálů pokrývů komunikací, proto byla nastavena nižší hodnota maximální povolené odchylky pro beton, dlažební kostku a štěrk. Tímto krokem byl částečně vyřešen problém záměny za častější materiál asfalt. I po nastavení odlišných omezujících podmínek v klasifikacích z území Rokytnice nad Jizerou docházelo k četnějším záměnám mezi klasifikovanými třídami.

Zpracování klasifikací metodou Linear spectral unmixing bylo velmi náročné, jelikož jako jediná klasifikace nevytvoří rastr s třídami, ale několik rastrových obrazů podle počtu koncových členů. Na základě nich lze vytvořit výsledný klasifikovaný obraz. Metoda pracuje zcela správně, pokud jsou vhodně zvoleny koncové členy. Je také vhodná pro klasifikaci povrchů, kde je předpokladem výskyt několika krajinných pokryvů v jednom pixelu. Prostorové rozlišení a použité masky komunikací a střešních krytin zejména u snímků ze senzoru APEX, snížily pravděpodobnost výskytu např. střešních materiálů červená taška a zelený plech v jednom pixelu, protože jednotlivé střechy byly odděleny. Ale protože jednotlivé antropogenní materiály jsou si spektrálně velmi podobné, byly tak třídy klasifikací velmi často zaměňovány.

Nedílnou součástí klasifikace byla verifikace výsledků pomocí dvou metod:

- podíl klasifikovaných pixelů,
- celková přesnost klasifikace.

Podíl klasifikovaných pixelů není úplně dokonalým ukazatelem přesnosti pro data použitá ze senzoru AISA, kde nebyla přesně vytvořena maska antropogenních materiálů. Ve třídách pokryvů komunikací zůstaly pixely reprezentující umělou travu, železniční trať či tartanovou dráhu, které se nepodařilo odmaskovat při tvorbě masky. Nedokonalost masky tak způsobila umělé zvýšení podílu klasifikovaných pixelů, kde byly tyto povrchy klasifikovány. Pro tento hodnotící ukazatel by bylo vhodné vytvořit přesnější masku antropogenních materiálů.

Další obtížností hodnocení přesností byl sběr kontrolních bodů. Vlastním průzkumem bylo zjištěno, že aplikace Google Street View představuje alternativní způsob hodnocení antropogenních povrchů. Určení typu pokryvu střech a komunikací je s velkou mírou jistoty možné pomocí této aplikace bez nutnosti cesty do terénu. Takový přístup není možný s ortofotem. Sběr kontrolních bodů byl tedy omezen na místa viditelná Google Street View a na počet kontrolních bodů získaných terénním šetřením (20 pro každé území). Celkem bylo získáno 100 kontrolních bodů pro typy střešních krytin a 100 kontrolních bodů pro typy pokryvů komunikací. Pro zhodnocení přesnosti nebyl získán požadovaný počet kontrolních bodů, tj. 50 kontrolních bodů pro každou klasifikovanou třídu. Nedostatečným počtem kontrolních bodů mohou být ovlivněny výsledky hodnocení přesnosti.

Na základě těchto dvou hodnocení přesnosti byly vybrány nejvhodnější klasifikační algoritmy pro klasifikaci antropogenních materiálů. Kritériem výběru bylo nejméně 70 % klasifikovaných pixelů a nejméně 70% úspěšnost klasifikace hodnocená na základě bodů z terénu a z Google Street View. Pro Čáslav byla u komunikací snížena požadovaná mez klasifikovaných pixelů o 5%, jelikož žádný klasifikační algoritmus nesplňoval předcházející podmínku. Příčinou může být právě menší spektrální rozsah dat ze senzoru AISA. Klasifikační algoritmy, které splňují zadané požadavky, jsou uvedeny v Tab. 13.

Nejlepším klasifikačním algoritmem pro data skeneru APEX s větším spektrálním rozsahem byl v práci klasifikátor SID, který má nejvyšší přesnost, jak u komunikací, tak u střešních krytin v obou územích. Metodou SID se podařilo klasifikovat střešní krytiny na celých plochách střech, kdežto při klasifikacích metodou SAM se objevovaly na střechách osamocené pixely jiné

třídy nebo část střechy nebyla klasifikována vůbec. Pro data s menším spektrálním rozsahem se zdá jako vhodnější klasifikační algoritmus SAM, který měl v případě dat ze senzoru AISA opět nejvyšší přesnosti klasifikací jak pro budovy, tak pro komunikace.

Tab. 13 Nejlepší klasifikační algoritmy (zdroj: vlastní zpracování)

typ zastavěného území	území	klasifikační algoritmus	vstupní data	počet koncových členů	Podíl klasifikovaných pixelů [%]	celková přesnost [%]
komunikace	Rokytnice nad Jizerou	SID	Obrazová spektra	4	80,00	71,74
	Harrachov	SID	Obrazová spektra	3	77,00	82,86
	Čáslav	SAM	Obrazová spektra	3	66,00	72,73
střešní krytiny	Rokytnice nad Jizerou	SID	Obrazová spektra	10	82,00	83,85
	Harrachov	SID	Obrazová spektra	7	73,00	75,51
	Čáslav	SAM	Obrazová spektra	5	77,00	82,50
	Čáslav	SID	Obrazová spektra	5	85,00	70,59
	Čáslav	SID	Spektra PPI	2	85,00	73,44

5.2 Zhodnocení možnosti využitelnosti spektrálních knihoven

Dále bylo třeba zhodnotit **možnosti využitelnosti různých typů spekter** pro klasifikaci. V Tab. 14 jsou shrnuty klasifikace na základě různých vstupních dat (spekter) pro jednotlivá území na základě celkové přesnosti s přihlédnutím k podílu klasifikovaných pixelů. Nejméně přesné jsou klasifikace provedené s využitím laboratorních spekter, o něco přesnější jsou klasifikace založené na terénních spektrech. Klasifikace ze spekter PPI indexu jsou ještě o něco přesnější, jejich přesnost se pohybuje kolem 60 % a nejpřesnější jsou klasifikace z obrazových spekter (viz Tab. 14 a Tab. 13).

Nejčastější záměny mezi třídami, případně další problémy klasifikací, k nimž docházelo prakticky při využití jakéhokoli klasifikátoru, jsou uvedeny v tab. 15. V Rokytnici nad Jizerou byl nejvíce zaměňován šterkový povrch komunikací s ostatními povrchy, což úzce souvisí se spektrální křivkou šterku. Při měření kontaktní sondou byla použita spektra šterku, která jsou nejvíce podobná asfaltu, proto byla také zaměňována za třídu asfalt. Šterk ale má spektrální vlastnosti podobné i betonovým povrchům, proto docházelo i k záměnám za ně. O něco vyšší odrazivost má šterk měřený optickým kabelem, proto byl zaměňován i se třídou asfalt s příměsí křemene. Nejvyšší odrazivost má šterk v obrazových spektrech (viz Obr. 23), proto byl velmi často zaměňován za třídu beton a asfalt s příměsí křemene. Černý plech a zelený plech mají ve

snímku velmi podobnou odrazivost. Dvě spektrální křivky zeleného plechu mají pouze nevýrazné maximum v zelené části viditelného záření (viz Obr. 24) a černý plech má jen o něco nižší odrazivost než zelený plech, proto dochází k jejich zaměňování v klasifikacích. Stejně tak mají podobné spektrální chování červený plech a červený eternit, proto byly taktéž zaměňovány.

Tab. 14 Posouzení vhodnosti spektrálních knihoven pro klasifikaci (zdroj: vlastní zpracování)

typ zastavěného území	území	klasifikační algoritmus	vstupní data (spektra)	počet koncových členů	Podíl klasifikovaných pixelů [%]	celková přesnost [%]
komunikace	Rokytnice nad Jizerou	SID	laboratorní	4	73,00	44,83
	Rokytnice nad Jizerou	SID	terénní	3	71,00	46,43
	Rokytnice nad Jizerou	SID	obrazová	4	80,00	71,74
	Harrachov	MESMA	laboratorní	3	32,00	59,46
	Harrachov	SAM	PPI index	4	77,00	66,67
	Harrachov	SID	obrazová	3	77,00	82,86
	Čáslav	SAM	laboratorní	3	54,00	78,67
	Čáslav	LSU	PPI index	2	48,00	79,59
	Čáslav	SAM	obrazová	3	66,00	72,73
střešní krytiny	Rokytnice nad Jizerou	SID	obrazová	10	82,00	83,85
	Harrachov	SAM	PPI index	7	57,00	43,59
	Harrachov	SID	obrazová	7	73,00	75,51
	Čáslav	SID	PPI index	2	85,00	73,44
	Čáslav	SAM	obrazová	5	77,00	82,50

Jelikož na území Harrachova mají velice podobnou spektrální odrazivost beton a asfalt s příměsí křemene, byly tyto materiály v klasifikacích při použití laboratorních spekter velmi často zaměňovány. Problém je však spojen s velmi malými plochami, na kterých se ve skutečnosti beton vyskytuje (viz Obr. 19). V klasifikacích ze spekter PPI byly zaměňovány nejen asfaltové plochy s příměsí křemene za beton, ale také za třídu asfalt. Beton má velice podobnou spektrální odrazivost v obrazových spektrech jako asfalt i jako asfalt s křemenem, tudíž byl beton zaměňován za ostatní materiály (viz Obr. 19). Spektrální křivka odrazivosti dvou měřených červených plechů má podobný spektrální průběh jako spektrální křivky z červených šindelů, pročež byly tyto dva materiály zaměňovány v klasifikacích všemi klasifikátory. Červený plech na sedlových střeších v neosvětlených částech, byl zaměněn za zelený plech, který má zde podobnou odrazivost. Velmi podobné spektrální chování mají zelený plech a černý šindel, proto v některých místech nebyly správně klasifikovány, zejména opět v zastíněných částech střech.

V Čáslavi byly v klasifikacích z laboratorních spekter zaměňovány nejvíce třídy beton a asfalt, což lze odůvodnit nevhodností dat z kontaktní sondy pro klasifikaci, protože průběh

spektrálních křivek ze snímku je naprosto odlišný (viz Obr. 15). Beton i asfalt byly však zaměňovány v malé míře i v klasifikacích ze snímku, jelikož všechny tři povrchy mají velice podobné spektrální chování (viz Obr. 15). Průběh spektrálních křivek červených tašek, červených plechů a červených šindelů je velmi podobný, ačkoliv v odrazivosti se výrazněji liší. Tudiž k záměnám těchto materiálů docházelo pouze v malé míře. K mnohem častějším záměnám docházelo v klasifikacích mezi červeným plechem a červeným šindelem.

Tab. 15 Problematická místa klasifikací (zdroj: vlastní zpracování)

Problematická místa klasifikací			
území	vstupní data	komunikace	střešní krytiny
		záměna a problém	záměna a problém
Rokytnice nad Jizerou	Kontaktní sonda	Beton ↔ štěrk, Asfalt s příměsí křemene ↔ asfalt	-
	Bezkontaktní sonda	Štěrk ↔ ostatní povrchy	
	Snímek	Štěrk ↔ ostatní povrchy	zelený plech ↔ černý plech, červený plech ↔ a červený šindel
Harrachov	Kontaktní sonda	málo klasifikovaných pixelů, asfalt s příměsí křemene ↔ beton	-
	PPI index	Asfalt ↔ beton	červený plech ↔ červené šindele, červený plech ↔ zelený plech, zelený plech ↔ černý šindel
	Snímek	Asfalt s příměsí křemene ↔ beton, asfalt ↔ beton	
Čáslav	Kontaktní sonda	beton ↔ asfalt	
	PPI index	dlažební kostka ↔ beton	neoddělitelné třídy červená taška, červený šindel a červený plech
	Snímek	beton ↔ asfalt a dlažební kostka ↔ asfalt	červený plech ↔ červený šindel, červený plech ↔ červená taška, červená taška ↔ červený šindel

5.3 Porovnání možností leteckých dat s vyšším a nižším spektrálním rozsahem

Dalším z cílů bylo porovnat možnosti leteckých dat s vyšším a nižším spektrálním rozsahem pro detekci antropogenních materiálů. Z výsledků vyplynulo, že s využitím dat ze senzoru APEX je možné klasifikovat více tříd než z dat senzoru AISA. Data APEX poskytují tedy v tomto smyslu větší možnosti (dokážou rozlišit až $2 \times$ tolik tříd střešních krytin). U dat s menším spektrálním rozsahem byl klasifikován totožný počet tříd povrchů komunikací, jako u dat s větším spektrálním rozsahem. Celková přesnost klasifikace i podíl klasifikovaných pixelů jsou vyšší u klasifikací s větším spektrálním rozsahem. Příčinou může být nejen nižší spektrální rozsah, ale také horší prostorové rozlišení dat pořízených senzorem AISA.

Data ze senzoru AISA jsou použitelná pro klasifikace s nižším počtem koncových členů, tj. na území s menší heterogenitou střešních krytin. Téměř všechny střechy na území Čáslavi jsou pokryty červenou taškou.

5.4 Vhodný postup klasifikace

Pro klasifikaci typů pokryvu komunikací a střešních krytin je třeba vytvořit zvlášť masku komunikací a masku střešních krytin nejlépe z polohopisných dat komunikací a budov. Masky obou typů materiálů mohou přispět k dobrým klasifikačním výsledkům. Klasifikace je tak omezena pouze na pixely pod maskou. Pro klasifikaci je vhodné použít metodu SAM a SID s omezujícími podmínkami pro jednotlivé typy materiálů. Nejvhodnějšími vstupními daty jsou pak obrazová spektra. Pro ně je však nutné v terénu zjistit typ pokryvů komunikací a střešních krytin.

5.5 Srovnání výsledků této práce s výsledky ze zkoumaných studií

Souhrnný přehled přesností klasifikací z diplomové práce a ze zkoumaných studií je v Tab. 16. K výsledkům klasifikací ze senzoru AISA existují pouze dvě srovnatelné studie (Koetz, et al., 2008; Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001), které pracovaly s nižším spektrálním rozsahem dat. V obou studiích však byl klasifikován celý snímek, nikoliv pouze pokryvy komunikací a střešních krytin. Celková přesnost těchto klasifikací je 75,4 a 75 %, což je srovnatelné s klasifikací povrchu komunikací (72,73 %), ale nižší než klasifikace střešních krytin (82,5 %).

Tento fakt je v případě uvedené studie pravděpodobně dán tím, že byly klasifikovány všechny kategorie krajinného pokryvu, které byly zaměňovány mezi sebou. Nebyla tedy jako v našem případě vytvořena maska.

Metodu použitou v této diplomové práci lze stejně jako metodu použitou ve studii Franke, et al. (2009) označit za hierarchickou klasifikaci, jelikož byly nejprve odmaskovány třídy vodních ploch, holé půdy a vegetace. V práci Franke et al. (2009) bylo klasifikováno celkem 13 tříd antropogenních povrchů s celkovou přesností 75,9 %. Autoři uvádějí, že byly často zaměňovány materiály jako je asfalt, tmavý šindel a kovová střecha, jelikož mají nízkou odrazivost. Počet koncových členů je srovnatelný s celkovým počtem koncových členů v Rokytnici nad Jizerou, kde jich bylo použito 14. V této diplomové práci byla oddělena klasifikace povrchu komunikací a střešních krytin, tím nebyly zaměňovány třída asfalt a třídy střešních krytin, čímž byla zvýšena přesnost klasifikace střešních krytin, která je vyšší než v uváděné studii. Celková přesnost klasifikace střešních krytin je 83,85 %. Celková přesnost klasifikace komunikací je však nižší, a to 71,74 %, což může být způsobeno zejména vyšším počtem klasifikovaných tříd v rámci povrchu komunikací. Ve studii Franke, et al. (2009) odlišovali pouze 2 třídy, kdežto v této práci jsou klasifikovány 4 třídy.

Další studií, která je vhodná pro srovnání, je práce Greiwe a Ehlers (200?), kteří použily data DMT, pro oddělení vyšších objektů od objektů na zemském povrchu. To je do určité míry srovnatelné s oddělením komunikací od budov v této práci. Celková přesnost klasifikace, kde bylo klasifikováno 12 tříd střech, byla 73,3 %. Přesnost je tak srovnatelná s celkovou přesností klasifikace Harrachova (7 tříd střech), která je 75,51 %. Celková přesnost klasifikace v Rokytnici nad Jizerou byla o něco vyšší, a to 83,85 %.

Podíl klasifikovaných pixelů komunikací v této práci je vyšší než ve studii Mohammadi, Hahn a Engels (2011), kteří uvádějí, že 66 % pixelů nebylo klasifikováno, tj. pouhých 44 % pixelů bylo klasifikováno. V této diplomové práci u nejlepších klasifikací je podíl klasifikovaných pixelů vyšší než 66 %.

Tab. 16 Porovnání výsledků diplomové práce a zkoumaných studií (zdroj: vlastní zpracování)

území	Metoda	Počet koncových členů komunikace/ střešní krytina	Přesnost klasifikací			
			Komunikace		Střešní krytiny	
			Podíl klas. pixelů [%]	Celková přesnost [%]	Podíl klas. pixelů [%]	Celková přesnost [%]
Rokytnice nad Jizerou	SID	4/10	80	71,74	82	83,85
Harrachov	SID	3/7	77	82,86	73	75,51
Čáslav	SAM	3/5	66	72,73	77	82,5
území	Metoda	počet koncových členů ant. materiálů	Podíl klasifikovaných pixelů [%]		Celková přesnost [%]	
Aix – en – Provence	SVM	9	x		75,4	
Tel Aviv	MTMF	3	x		76	
Bonn	MESMA	13	x		75,9	
Osnabrück	SAM a Neuronové síť	13	x		73,3	
Ludwigsburg	SAM	3	44		x	

Na závěr tak lze říci, že bylo dosaženo poměrně vysokých přesností klasifikace, jak pro data senzoru AISA s menším spektrálním rozsahem, tak pro data senzoru APEX s větším spektrálním rozsahem za pomoci klasifikátorů SAM a SID a vstupních dat ze snímku.

6 ZÁVĚR

V předkládané práci byla nastíněna metodika detekce a klasifikace antropogenních materiálů. Byly vytvořeny spektrální knihovny z různých vstupních dat a byly zhodnoceny jejich možnosti pro využití klasifikace. V práci byly použity dva typy leteckých dat, a proto byly porovnány jejich možnosti pro detekci antropogenních materiálů.

K řešení stanovených cílů pro dvě zájmová území Rokytnice nad Jizerou a Harrachov byly použity hyperspektrální snímky ze senzoru APEX. Pro zájmové území Čáslav byl použit snímek ze senzoru AISA. Nad snímky byly nejprve vytvořeny dvě masky. Jedna maska byla vytvořena pro komunikace a druhá pro střešní krytiny. Následně byly provedeny klasifikace čtyřmi klasifikačními algoritmy:

- Linear Spectral Unmixing,
- Multiple Endmember Mixture Analysis,
- Spectral Angle Mapper,
- Spectral Information Divergence.

Zvlášť byly klasifikovány povrchy komunikací a střešních krytin. Vstupními daty (koncovými členy) klasifikace byly spektrální knihovny z laboratorních, terénních, obrazových spekter a dále čistá spektra získaná pomocí metody index čistoty pixelu.

Zmíněným způsobem bylo zpracováno 56 klasifikací, které byly zhodnoceny pomocí metod podílu klasifikovaných pixelů a celkové přesnosti klasifikace. Tím byly zjištěny nejvhodnější klasifikační algoritmy pro detekci antropogenních materiálů: **Spectral Angle Mapper** a **Spectral Information Divergence** a nejvhodnější vstupní data: **obrazová spektra**. V kombinaci těchto klasifikačních metod a obrazových spekter bylo klasifikováno nejvíce pixelů a zároveň klasifikace dosahovaly nejvyšších přesností, tj. přes 70 %.

Následně byly porovnány možnosti dat s menším spektrálním rozsahem a s větším spektrálním rozsahem. Bylo zjištěno, že data s menším spektrálním rozsahem jsou zcela dostačující pro klasifikaci pokryvů komunikací. Naopak v případě podrobné klasifikace střešních krytin dosáhnou lepších výsledků data s větším spektrálním rozsahem.

Zhodnocené výsledky u celkové přesnosti komunikací se příliš nelišily oproti porovnávané celkové přesnosti klasifikací ve zkoumaných studiích (Koetz, et al. 2008; Ben Dor, Levin, Saaroni, 2001; Franke et al., 2009; Greiwe a Ehlers, 200?).

Tato práce by mohla být dále rozvíjena například s využitím spekter materiálů střešních krytin změřených kontaktní sondou a optickým kabelem, což by umožnilo posoudit, zda tato data, která nebyla v práci využita, pomohou dále zvýšit přesnost klasifikace. Pokud se týká možných vylepšení použitých metod, bylo by vhodné zdokonalit tvorbu masky antropogenních povrchů pro snímek z hyperspektrálního senzoru AISA. Jeden z možných způsobů byl uveden ve studii Mohammadi, Hahn a Engel (2011), kde byla použita vektorová vrstva komunikací pro georeferencování snímku. Jedním z významných zjištění této diplomové práce je, že právě

využití oddělených masek pro budovy a komunikace je důležitým krokem postupu, který vede ke zvýšení přesnosti klasifikace těchto objektů.

SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

Seznam tištěných publikací

- ANDERSON J. R., HARDY E.E., ROACH, J.T., WITMER, R. E. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. *USGS Professional Paper*. South Dakota. 1976. p. 28.
- ARITA, J., SASAKI, K., ENDO, T. YASUOKA, Y. 2001. Assessment of Concrete degradation with Hyper-spectral Remote Sensing. *Paper presented at Asian Conference on Remote Sensing*. 2001. 5 p.
- BEN DOR, E. 2001. Imaging Spectrometry : *Imaging spektrometry for urban applications*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2001. 407 p. ISBN 1-4020 -0194-0.
- BEN DOR, E., LEVINN N., SAARONI, H. 2001. A spectral based recognition of the urban environment using the visible and near- infrared spectral region (0.4 – 1.1 μm). A case study over Tel – Aviv, Israel. *International Journal Remote Sensing*. v. 22, 2001. p. 2193 – 2218.
- CAVALLI, R. M., et al. 2008. Hyperspectral sensor data capability for retrieving complex urban land cover in comparison with multispectral data: Venice city case study (Italy). *Sensors*. v.8, 2008. p. 3299 - 3320.
- DOBROVOLNÝ, P. 1998. *Dálkový průzkum Země, Digitální zpracování obrazu*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 1998. 210 s. ISBN: 80-210-1812-7.
- FRANKE, J., ROBERTS, D., HALLIGAN, K., MENZ, G. 2009. Hierarchical Multiple Endmember spectral mixture analysis of hyperspectral imagery for urban environments. *Remote Sensing of Environment*. v.113, 2009. p. 1712 – 1723.
- GOETZ, A. F. H. 2009. Three decades of hyperspectral remote sensing of Earth : A personal view. *Remote Sensing of Environment*. v. 113, 2009. p. 5 – 16.
- GREIWE, A., EHLERS, M. 200?. Combined analysis of hyperspectral and high resolution image data in an object oriented classification approach. University of Osnabrueck. 200?. 6 p.
- HEIDEN, U. et al. 2007. Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data. *Remote sensing of Environment*. v. 111, 2007. p. 537 – 552.
- HELDENS, W., ESCH, T., HEIDEN, U., MULLER, A., DECH, S. 2009. Exploring the demands on hyperspectral data products for urban planning: a case study in the Munich region. In Ben Dor, E., editor, *Proceedings of the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop*, Tel Aviv, Israel. 2009. 6 p.

- HEROLD, M. 2004. *Understanding spectral characteristics of asphalt routs*. University of California Santa Barbara, 2004. 8 p.
- HEROLD, M., ROBERTS, D. A., GARDNER, M. E., DENNISON, P.E. 2004. Spectrometry for urban area remote sensing – Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*. v. 91, 2004. p. 304 – 319.
- ITTEN, I. K. et al. 2008. APEX – the Hyperspectral ESA Airborne Prism Experiment. *Sensors*. v.8, 2008. p. 6235 – 6259.
- KOETZ, B., MORSDORF, F., VAN DER LINDEN, S., CURT, T., ALLGÖWER, B. 2008. Multi- source land cover classification for forest fire management based on paging spectrometry and LIDAR data. *Forest ecology and management*. v. 256, 2008. p. 263 – 271.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., CHIPMAN, J.W. 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 6th ed. United States of America : Wiley, 2008. 756 p. ISBN: 978-0-470-05245-7
- MEDINA, M. A., 2000. Effects of shingle absorptivity, radiant barrier emissivity, attic ventilation flow rate, and roof slope on the performance of radiant barriers. *International journal of energy research*. v. 24, 2000. p. 665 – 678.
- MOHAMMADI, M., HAHN, M., ENGELS, J. 2011. Road classification and condition investigation using hyperspectral imagery. *AGSE*. 2011. 12 p.
- NASARUDIN, N. E. M., SHAFRI, H. Z. M. 2011. Development and utilization of urban spectral library for remote sensing of urban environment. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. v. 5, n. 1, 2011. p. 44 – 56.
- PARK, P. , et al., 2007. Contaminant Classification of Poultry Hyperspectral Imagery using a Spectral angle mapper algorithm. *Biosystems Engineering*. v. 96, 2007. p. 323 -333.
- PLAZA A., et al., 2004. A new approach to mixed pixel classification of hyperspectral imagery based on extended morphological profiles. *Pattern Recognition*. v. 37, 2004. p. 1097 – 1116.
- RASHED T., JÜRGENS C., 2010. *Remote sensing of Urban and Suburban Areas*. Berlin : Springer, 2010. 355 p. ISBN : 978-1-4020-4371-0.
- RIDD, M. K., 1995. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface – soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing : comparative anatomy for cities. *International journal of remote sensing*. v. 16, 1995. p. 2165 – 2185.
- SHIEFER, S., HOSTER, P., DAMM, A. 2006. Correcting brightness gradient in hyperspectral data from urban areas. *Remote Sensing of Environment*. v. 101, 2006. p. 25 – 37.
- ÚSBE AV ČR. 2010. Protokol letecké hyperspektrální kampaně. Brno: ÚSBE AV ČR. 2010. 5 s.

VITO, 2013. Apex 2012 – September campaign HyMountEcos data delivery report. 2013. 17 p.

WENG, Q., HU, X. and LU., D. 2008. Extracting impervious surfaces from medium spatial resolution multispectral and hyperspectral imagery: a comparison. *International Journal of Remote Sensing*. v. 29, n. 11, 2008. p 3209 – 3232.

Seznam elektronických zdrojů

ASD INC., 2013. *FieldSpec4 Wide-Res Spectroradiometer*. 2013[cit. 2013-08-06]. Dostupné z: <<http://www.asdi.com/products/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-4-wide-res>>.

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. 2013. *Mapy charakteristik klimatu*. 2013[cit. 2013-06-24]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_3_Mapy_char_klim&last=false>.

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. 2012. *Obyvatelstvo v obcích k 31. 12. 2012 v Libereckém kraji*. 2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.czso.cz/xl/redakce.nsf/i/120531_obyvateľstvo>.

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. 2013. *Databáze demografických údajů za obce ČR*. 2013 [cit. 2013-06-24]. Dostupné z: <http://www.czso.cz/cz/obce_d/index.htm>.

ČESKÉ STAVBY. 2010. *Jak se staví silnice?* 2010 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <<http://www.ceskestavby.cz/clanky/silnice-dopravni-stavby-inzenyrske-6855.html>>.

ENVI TUTORIAL. 2009. Spectral Angle Mapper (SAM) and Spectral Information Divergence (SID). *Exelis Tutorials* [online]. 2009 [cit. 2013-08-14]. Dostupné z: <http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/SAM_SID_Classification.pdf>

GALILEO Group Inc., 2007. *AISA Eagle Hyperspectral Imaging Sensor*. 2007 [cit. 2013-08-14]. Dostupné z: <http://www.galileo-gp.com/aisa_eagle.html>

HEROLD M., ROBERTS, A., 2004. *Imaging spectrometry of urban materials*. 2004[cit. 2013-08-14]. Dostupné z <http://www.geogr.uni-jena.de/~c5hema/spec/imaging_spectrometry_of_urban_materials.pdf>

REGIONÁLNÍ ROZVOJ KRKONOŠ. 2012. *Dopravní dostupnost a obslužnost*. 2012 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z <<http://www.rozvoj.krkonose.eu/cz/prilezitosti-v-uzemi/dopravni-dostupnost-a-obsluznost/>>.

ROBERTS, D. A. 1996. *BEACON eSpace at Jet Propulsion Laboratory* [online]. 1996 [cit. 2013-08-14]. Dostupné z: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/20241/1/98-1135.pdf>

SIPPART, P., 2003. Introduction to Hyperspectral Image Analysis. *Online Journal of Space Communication*, issue 3, 2003 [cit. 2013-08-14], Dostupné z: <<http://spacejournal.ohio.edu/pdf/shippert.pdf>>

SPRÁVA KRNAP. 2010. *Geologie*. 2010 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z <
<http://www.krnep.cz/geologie/>>.

STŘEDNÍ ČECHY. 2003. *Podnebí*. 2003 [cit. 2013-06-24]. Dostupné z <<http://priroda.kr-stredocesky.cz/article.asp?id=35>>.

MVČR. 2013. *Centrální registr vozidel*. 2013 [cit. 2013-08-11]. Dostupné z:
<<http://www.mvcr.cz/clanek/centralni-registr-vozidel-865510.aspx?q=Y2hudW09Mw%3d%3d>>

Seznam datových zdrojů

ARCDATA Praha s.r.o. a kol. 2012. *ArcČR 500 - digitální geografická databáze 1 : 500 000* [online]. Verze 3.0.

CENIA. 2013. *Topografická mapa ČR* [online]. c2013 [cit.2013-07-11]. Dostupné z
<<http://geoportal.gov.cz>>

ČÚZK, 2012. *Prohlížečí služba WMS – ortofoto* [online]. c2013 [cit. 2013-07-12]. Dostupné z
<http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMSService.aspx>.

ČÚZK. 2012. *Prohlížečí služba WMS - Základní báze geografických dat* [online]. c2013
[cit. 2013-07-11]. Dostupné z:
<http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ZABAGED_PUB/WMSService.aspx>

ČÚZK. 2012. *Prohlížečí služba WMS - Základní mapa ČR* [online]. c2013 [cit.2013-07-11].
Dostupné z http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ZM10_PUB/WMSService.aspx

ČÚZK. 2013. *Katalog objektů ZABAGED*, verze 2.4, ve znění dodatku č. 1, Praha 2013.

PŘÍLOHY

Příloha 1	CD s elektronickou podobou práce
Příloha 2	Terénní měření v Rokytnici nad Jizerou
Příloha 3	Terénní měření v Harrachově
Příloha 4	Terénní měření v Čáslavi
Příloha 5	Spektrální katalog Rokytnice nad Jizerou
Příloha 6	Spektrální katalog Harrachov
Příloha 7	Spektrální katalog Čáslav
Příloha 8	Klasifikace území Rokytnice nad Jizerou z laboratorních spekter
Příloha 9	Klasifikace území Rokytnice nad Jizerou z terénních spekter
Příloha 10	Klasifikace území Rokytnice nad Jizerou z obrazových spekter
Příloha 11	Klasifikace území Harrachova z laboratorních spekter
Příloha 12	Klasifikace území Harrachova z PPI spekter
Příloha 13	Klasifikace území Harrachova z obrazových spekter
Příloha 14	Klasifikace území Čáslavi z laboratorních spekter
Příloha 15	Klasifikace území Čáslavi z PPI spekter
Příloha 16	Klasifikace území Čáslavi z obrazových spekter
Příloha 17	Klasifikace území Rokytnice nad Jizerou metodou SID a z obrazových spekter
Příloha 18	Klasifikace území Harrachova metodou SID a z obrazových spekter
Příloha 19	Klasifikace území Čáslavi metodou SAM a z obrazových spekter
Příloha 20	Ortofoto Dolního náměstí v Rokytnici nad Jizerou
Příloha 21	Ortofoto pivovaru a okolí v Harrachově
Příloha 22	Ortofoto náměstí a okolí v Čáslavi